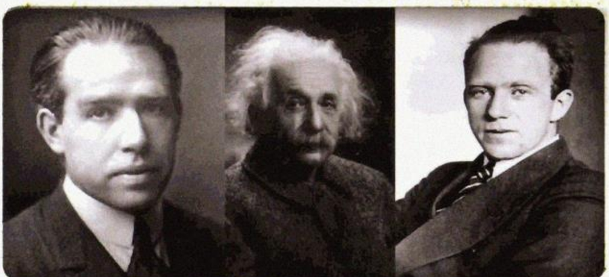
مبدأ الريبة

أينشتين، هازينبرج، بور
والصراع من أجل روح العلم



ديفيد لندلي

ترجمة: نجيب الحصادي



المؤلف

ديفيد ليندلي

حصل على شهادة الدكتوراه في الفيزياء الفلكية، وعمل محرراً في المجلات العلمية التالية:

Nature, Science, and Science News

يعيش في الكزاندريا، فيرجينيا.

أعمال أخرى للمؤلف

The End of Physics,
Degrees Kelvin,
Where Does the Weirdness Go?
Boltzmann's Atom
The Science of "Jurassic Park" and "The Lost World" [with Rob De Salle].

مبدأ الريبة

مبدأ الريبة

تأليف / David Lindley

الطبعة 1430 هـ - 2009 م

ص.ب 2380 أبو ظبي، الإمارات العربية المتحدة هاتف 26314468 971 + فاكس 79126314462 +

دار العين للنشر www.elainpublishing.com

الإدارة : 97كورنيش النيل - روض الفرج - القاهرة

تليفون: 24580360 2+ فاكس: 24580955 2+

المدير العام: د. فاطمة البودي

رقم الإيداع بدار الكتب المصرية:15829/ 2008

ISBN 978 977 6231 57 3

هذه الترجمة العربية لكتاب : Uncertainty– David Lindley

مبدأ الريبة

أينشتين، هازينبرج، بور

والصراع من أجل روح العلم

تأليف

ديفيد لندلي

ترجمة

نجيب الحصادي

كلمة

KALIMA

دار الكتب والوثائق القومية

فهرسة أثناء النشر إعداد إدارة الشئون الفنية

لندلي، ديفيد.
مبدأ الريبة/ أينشتين، هازينبرج، بور. والنزاع حول روح العلم/ تأليف ديفيد لندلي؛ ترجمة نجيب الحصادي.
الإسكندرية: دار العين للنشر، (2008، 316 ص ب24 سم)
بتدمك: 978 977 6231 57 3
1- العلوم- فلسفة.
أ. الحصادي، نجيب (مترجم)
ب. العنوان 501

تقريط عمل ديفيد لندلي

مـبدأ الريبـة

«يضع دراما إنسانية مشبوبة على قمة إنجاز علمي محير»

– Discover Magazine

«تصور كتب بعناية فائقة ... ؛ سرد على طريقة الزمن الجميل؛ وشخصيات غريبة الأطوار»

–The Providence Journal

«سبق لهذه القصة أن رويت من قبل، ولكن نادرًا بمثل هذا الوضوح والأناقة»

– Scientific American

«لقد أجري البحث بطريقة أخّاذة»

– New Scientist

«إن ديفيد ليندلي، الفيزيائي والمؤلف الماهر في العلوم، يترسم بطريقة متقنة ملامح اللاعبين والرقعة في مؤتمرات سولفي؛ حيث خسر أينشتين معركته ضد العالم الكمومي»

– USA Today

«يأسر لندلي روح الصراع؛ حيث يعرض كلا من القضايا الخلافية التي نوقشت على الملأ، والأحكام الخصوصية المؤلمة أحيانًا... إن القصة تروى بطريقة مفعمة بالحيوية»

– Nature

ديفيد لينـدلي

حصل على شهادة الدكتوراه في الفيزياء الفلكية، وعمل محررًا في المجلات العلمية التالية:

Nature، Science، and Science News

يعيش في الكزاندريا، فيرجينيا.

أعمال أخرى للمؤلف

The End of Physics،
Degrees Kelvin،
Where Does the Weirdness Go?
Boltzmann>s Atom
The Science of «Jurassic Park» and «The Lost World» [with Rob De Salle].

المحتويات

إنه إله النظام وليس إله الفوضى.

إسحق نيوتن

كانت الفوضى قانون الطبيعة؛ فيما كان النظام حلم الإنسان.

هنري آدمز

تقديم المترجم•

بلغة لا تصعب على من ألف حدًا أدنى من مفردات علم الفيزياء، وبأسلوب شائق لا نعهده في كتب تأريخ العلم، يعرض هذا الكتاب ملحمة تشكيل نظرية الكم ركائزها العلمية والتطورات التي مرت بها والصيغ التي انتهت إليها، ويعرج على تفاصيل شخصية واجتماعية وسياسية تضع هذه الملحمة في سياق ثقافي عام، وآخر فلسفي خاص، يركز على حالة الجدل التي أثارتها نظرية الكم، ويعني بالمضامين الميتافيزيقية والمعرفية والحمولات القيمية والمنهجية التي يعتمل بها مبدأ الريبة، قطب رحى هذه النظرية ومركز عود ثورتها على الفيزياء التقليدية.

ثمة حقيقة بدهية، وإن ظلت مؤسية، مفادها أن الكائنات البشرية ليست كلية العلم. لم يسبق لأحد من البشر أن عرف كل شيء، ومن غير المرجح أن يتسنى لأحد منهم أن يعرف كل شيء. هذا حكم يختلف الفلاسفة على تسويغه، لكنهم قد لا يجمعون على شيء قدر إجماعهم عليهم. حتى في السياقات العلمية؛ حيث توظف أدوات ضبط غاية في الإحكام، تعاني النتائج التجريبية من عوز في الدقة، فيما تؤسس الفروض العلمية على شواهد تقصر عن ضمان صحتها.

غير أنه لا يبدو أن هناك ما يحول من حيث المبدأ دون هتك حجب الجهل البشري حال تيسر الأدوات المناسبة لهتكها. الراهن أن هذا مؤدي مذهب أشياع الحتمية، الخصوم التقليديين لمبدأ الريبة. إذا عرف الإنسان كل الأوضاع الراهنة في الكون وأدرك مجمل النواميس التي تحكم ظواهره، سوف يستطيع الدراية بجميع أوضاع مستقبله. بيد أن هذا الحكم يبدو بدهيًا وغاية في الضعف، أقلّه لأنه يقال بصيغة شرطية يصعب استيفاء أشراطها.

مكمن خطر مبدأ الريبة أنه إنكار مؤسس علميًا للمذهب الحتمي الذي بدا لقرون غاية في البداهة. لقد عبر ماركيز دي لابلاس أبرز دعاة عن هذا المذهب بقوله إن "المفكر الذي يعرف في كل لحظة كل القوى التي تبث الحياة في الطبيعة والمواضع

المتبادلة التي تتخذها الكائنات التي تتألف منها هذه الطبيعة، إذا كان عالمًا بما يكفي لتحليل البيانات، سوف يستطيع أن يكثف في معادلة واحدة حركة أجسام الكون الأعظم وحركة أخف ذراته؛ عند هذا المفكر، لا شيء موضع ارتياب، والمستقبل، مثل الماضي، سوف يكون ماثلاً أمام عينيه."

المثال اللابلاسي، وإن لم يضمن المعرفة الكلية واقعًا ملموسًا، يتضمن وعدًا بها، وعدًا بفردوس اليقين، يرتهن تحقيقه بتبني خيار العلم واستمرار الحياة الدنيا أبد الآبدين. هذا ما يجعل الحتميين واثقين من تراكمية العلم، من "أن طواحينه سوف تطحن دقائق متعاظمة الصغر"، ومن أنه لا شيء يحول دون المعرفة الكلية سوى فناء الجنس البشري. باختصار، الطبيعة وفق هذا المثال قابلة لأن تعرف، "وإذا حدث أن تعثر مشروع الفهم العلمي المطلق، فلأن العقل البشري لم يكن قادرًا على إنجاز هذه المهمة، وليس لأن الطبيعة لم تكن قابلة للفهم."البشارة الحتمية إذن قاطعة لا مواربة فيه: إذا انتظرنا ما يكفي من الوقت، سوف نعرف كل شيء. وعلى حد تعبير أينشتين، فإن "أشد الأشياء استغلاقًا على العقل هو أن العالم يمكن تعقله"، ما يعني أن كل شيء في الطبيعة قابل للفهم، إلا كونها قابلة للفهم.

غير أن هايزنبرج، صاحب مبدأ الريبة، يشكك في هذا البشارة. حتى لو استطاع البشر معرفة الأوضاع الراهنة في الكون، لن يتمكنوا من التنبؤ بمستقبله. تحديدًا، كلما كان الملاحظ أكثر دقة في قياس طاقة حدث كمومي ما، قلّت قدرته على تحديد زمن هذا الحدث؛ وكلما جاهد في الحصول على معلومات عن موضع الإلكترون، قل احتمال درايته بكمية حركته؛ وكلما ازداد تيقنًا من كمية حركته، استعصت عليه معرفة موضعه. ليس هذا "مجرد قيد على الانتشار الإحصائي لنتائج القياس، بل مبدأ يقنن ما يمكن قوله عن الجسيمات بوجه عام". إنه يشي بعجز بشري متأصل عن فهم العالم الفيزيقي. لا شيء يمكن أن يعرفه البشر بمعنى نهائي، لأن كل ما يوجد إنما يوجد بوصفه احتمالاً (Steve J. Bissel).

يقال إن أرنست رذرفورد سأل نيلز بور عما يسبب تحول الإلكترون من وضع إلى آخر، وإن بور أمضى معظم ما تبقى من حياته في محاولة توضيح أن السؤال غير مهم. لا شيء "يسبب" تحول الإلكترون، والأمر برمته لا يعدو أن يكون دالة احتمالية. يبدو

أن مبدأ الريبة يبشر بأن عهد السببية قد ذهب إلى غير رجعة وأن عالمنا شيء عارض تمامًا، أنه "ببساطة واحد من تلك الأشياء التي تحدث بين الحين والآخر" (Edward Tryon).

هناك إذن هشاشة في البنية التحتية، في مواضع بدت آمنة على نحو بدهي، وثمة جهل محتم مأتاه أن القياسات التي يقوم بها العلماء ليست تصورات خاملة لعالم موضوعي، مفارق ومعتصم باستقلاليته؛ بل تفاعلات عاملة يسهم فيها المقاس بقدر ما تسهم فيها الطريقة التي تم بها القياس.

غير أن مبدأ الريبة الذي يقول به هايزنبرج ليس مجرد تأكيد لشيء نعرفه أصلاً، أن حضور الملاحظ يؤثر بطريقة ما في سلوكيات ما يقوم بملاحظته، فهذه نتيجة أسفرت عنها منذ أمد بعيد دراسات إنسانية واجتماعية عديدة. الجديد في هذا المبدأ هو أن القياس لا يزعج المقاس فحسب بل يقوم بتحديده. حقيقة أن ما نحصل عليه من القياس يتوقف على ما اخترنا قياسه لا طرافة فيها؛ الطريف هو "أن قياس جانب من النسق يوصد الباب في وجه ما يمكن اكتشافه من أشياء أخرى، ومن ثم فإنه يقيد بشكل محتم المعلومات التي يمكن لأي قياس مستقبلي أن يفضي إليها".

هذا يختلف عن الحكم البدهي أن البشر يعرفون أشياء ولا يعرفون أخرى، وعن الحكم الحتمي أننا لو عرفنا أشياء لعرفنا كل شيء. إن مبدأ الريبة يقر أن معرفتنا بأشياء مأتى جهلنا بأخرى؛ كما لو أن العلم يحتم الجهل. في العلم قبل ميكانيكا الكم، "لكل شيء موضع، وثمة موضع لكل شيء"، وإمكان فهم العالم مؤسس على إمكان التعرف على أجزاء المادة ومواضعها وطاقتها وكمية حركتها. أما في العلم الكمومي، فالعالم غير قابل للفهم لأنه لا رجاء في معرفة كل هذه الأشياء في آن واحد.

غير أن الاستحالة هنا ليست منطقية؛ إذ لا تناقض منطقي في إمكان أن يعرف البشر كل شيء؛ كما أنها ليست سيكولوجية، لأن إقرار عجز البشر عن المعرفة الكلية لا ينهض في هذا السياق على قصور قدراتهم الذهنية أو ضعف استعداداتهم العقلية. إنها استحالة فيزيقية، بمعنى أن طبيعة العالم نفسها لا تسمح بها. إن هذا المبدأ لا يقول إن البشر قد خلقوا على نحو يحول دون قدرتهم على فهم العالم؛ بل يقول إن العالم قد خلق على نحو يحول دون قدرتهم على فهمه.

هكذا تقلق الريبة النظام القديم، ليس فقط في حالة الدقائق المجهرية؛ بل حتى في إحصاءات الجريمة، وشؤون الحرب والقتال، وحركة الأجرام السماوية في مجرات الكون القصية. فجأة أصبحت كل اليقينيات موضع شك، وبغتة بدا الأمل في المعرفة زائفًا. لقد استبين في نهاية المطاف، وخلافًا لما اعتقد أينشتين، أن ثمة من يلعب بالنرد؛ أن ثمة من يرمي به حيث لا يراه أحد (Stephen Hawking).

ﺑ العلم إذن ظني لأسباب مغايرة لقصور الشواهد البشرية، ولضعف قدرات البشر الذهنية؛ بل مغايرة حتى لقلة حيلة الإنسان أمام رغائبه وأهوائه. العلم ظني لأسباب كامنة في الطبيعة نفسها. المناقب التي ظلت العلوم الطبيعية تستعلي بها قرونًا على العلوم الإنسانية، الموضوعية والدقة وضبط المتغيرات، والناجمة جزئيًا عن كونها تتعامل مع جوامد لا إرادة حرة لديها ولا مواقف عاطفية يتخذها العلماء إزاءها، تفقدها فجأة، وتفقد معها مبرر نظرتها الدونية للإنسانيات. هذا مكمن خطر مبدأ هايزنبرج في الريبة؛ لم يعد هناك ما يسمى بالعلوم الدقيقة.

بيد أن مبدأ الريبة لا يتطلع إلى جعل "الصحافة أو الأنثروبولوجيا أو النقد الأدبي تخصصات علمية؛ بل يخبرنا أن المعرفة العلمية، مثل فهمنا العادي للعالم اليومي الذي نعيش فيه، يمكن أن تكون عقلانية وعارضة، هادفة وطارئة." إنه لا يجعل التخصصات الأقل علمية أكثر علمية؛ بل يجعل التخصصات التي بدت لقرون علمية أقل علمية مما توهمنا. إنه باختصار مدعاة للمزيد من الاحتراز في إصدار الأحكام.

وفق هذا، لم يعد هناك براح لليقين والإطلاق والجزم، ولم يعد ثمة حق لأحد في أن يزعم أن للحقيقة وجهًا واحدًا أو بأن جهة دون غيرها قد عرفت هذا الوجه. يحدث هذا في العلم، معقل الملاحظة والتجريب وإعمال أشد معايير الاختبار صرامة وإحكامًا؛ فما عسى أن يكون عليه الأمر حين يرتهن بمسائل ميتافيزيقية أو أخلاقية أو سياسية أو أدبية؟ يظهر أن النزعة الدوجماطيقية بمختلف تمظهراتها تلقى مصارعها على يد هذا المبدأ، وأن بقاءها إلى يومنا هذا لا يثبت سوى عناد أنصارها.

ثمة عناية خاصة يوليها مؤلف الكتاب لما يسميه باستراتيجيات التنظير. هناك علماء يجدون حرجًا في قول ما لا يستطيعون التعبير عنه في معادلات رياضية، لأنهم يجدون في قابلية الفرض لأن يعبر عنه بطريقة صورية استحقاقًا أساسيًا لعلميته

(بورن). في المقابل، ثمة من يشترط قابلية الفرض للتجريب واقتداره على حل المشاكل (سمرفيلد)، دون أي احتفال بالأناقة الرياضية أو العمق الفلسفي. غير أن هناك من يعترض على بعض الفروض العلمية لأنه وإن فهمها بعقله لم يفهمها بقلبه (هايزنبرج)، كما لو أن للقلب أسبابًا مشروعة لا يدركها العقل (بسكال)؛ وهناك أيضًا من يقيم اعتبارًا خاصًا للمعايير الاستاطيقية، كالبساطة والأناقة في العرض (أينشتين)، فيما يرى أحد رواد ميكانكيًا الكم أنه لا يستطيع "أن يفهم معنى أن تكون النظرية جميلة، إذا لم تكن صحيحة" (بور). وبطبيعة الحال، فإن هذا التنوع في استراتيجيات التنظير يسهم في إثراء النشاط العلمي، ويكرس المسحة الظنية التي تشوب عملياته، ويشكك في صحة الوعود الحتمية. من منحى آخر، فإن نقاش هذه الاستراتيجيات يسهم في تفسير عنوان الكتاب الفرعي؛ ثمة رؤى مختلفة في العلم، صراع من أجل روحه، وكل طرف في هذا النزع يزعم أنه الظافر بهذه الروح.

هناك ملمح آخر يسم عمل ديفيد ليندلي. إنه يعرض شخصيات ملحمة تشكيل نظرية الكم بأسلوب سيكو-سوسيولوجي [نفس-اجتماعي]. هناك عناية بالعواطف والأمزجة والسجايا والأطوار الغريبة، بمشاعر البهجة والحسد والألم والمعاناة، وبقيم المثابرة والجلد والإخلاص والولاء، وبميول التشبث والعناد والاستعلاء والمكابرة. الراهن أن كتاب "الريبة" لا يزعزع ثقتنا في مفاهيم "الكلمة الفصل"، و"الحل النهائي"، و"الحقيقة المطلقة" فحسب؛ بل يزعزعها في العلماء الكبار، من سلمنا بأنهم قدوة يتأسى بها في الموضوعية والنزاهة والحياد.

وأخيرًا، يتبدى أن مآل الخوض في دلالات علم ميكانيكا الكم أن يثير أسئلة معرفية ووجودية قد لا يرى كثير من العلماء طائلاً من ورائها. غير أنها تظل أسئلة مهمة. إنها تبين كيف أن العلم نشاط مقلق وأن أحكامه حمّالة أوجه ومثيرة للخلافات القيمية، وأن كل هذا إنما يجعله نشاطًا إنسانيًا بامتيازًا. هذا أيضًا ما يجعل كتاب الريبة استثنائيًا من أوجه عديدة. إنه يلبي في آن شغف العالم والفيلسوف والفنان؛ وقبل كل ذلك وبعده، شغف الإنسان.*

* بعض الاقتباسات الواردة في هذا التقديم مستلة من متن الكتاب، وبعضها الآخر (المقترن بأسماء أصحابها) مقتبس من مراجعات للكتاب منشورة في الملف الخاص به في www.amazon.com.
ولا يفوتني في ختام هذا التقديم أن أنوه إلى أني آثرت الريبة ترجمة لعنوان الكتاب Uncertainty على اللاتيقن لعدة اعتبارات: أولها: لغوية؛ فأداة التعريف لا تدخل على أدوات النفي، وثانيها: أن اللاتيقن موقف سلبي خامل، في حين أن الريبة موقف إيجابي عامل، وهذا ما أراده صاحبه منه، وثالثها: أن حالة عدم التيقن قد تنتاب كل البشر، ولكن الريبة لا تليق إلا بالعلماء والمفكرين، ورابعها: أن "بعض الفلاسفة، ممن اعتقدوا أن البحث عن تصور موضوعي في الطبيعة مجرد وهم، اعتبروا مبدأ الريبة دليلاً على أن العلم نفسه يؤكد الآن شكوكهم"، ما يعني أن هذا المبدأ يرتبط بالنزعة الارتيابية Skepticism حدًا يسوغ عدّه تعبيرًا علميًا عنها، ويبرر ترجمة عنوان الكتاب على النحو الذي آثرت. لا يفوتني أيضًا أن أتوجه بخالص شكري وتقديري وعرفاني إلى أخي وصديق عمري فهيم المحجوب الحصادي، الذي قام بمراجعة شاملة ودقيقة لمخطوط هذه الترجمة، وأبدى ملاحظات وتعديلات أخذتها في الاعتبار.

تقديم المؤلف

إذا كان العلم محاولة لاستنباط النظام من الفوضى، فإنه في بداية عام 1927 قد جنح شطر طريق لم تكن في حسبان أحد. ففي مارس ذلك العام، شكل فرنر هايزنبرج [Werner Heisenberg]، الذي كان عالم فيزياء لم يتجاوز الخامسة والعشرين من عمره، وإن حظي بشهرة عالمية، استدلالاً علميًا بسيطًا وبارعًا ومدهشًا بالقدر نفسه. لم يكن في وسع هايزنبرج نفسه أن يزعم معرفة ما قام به. لقد كدّ في البحث عن كلمة مناسبة تعبر عن معناه. في معظم الأحيان، كان يستخدم كلمة ألمانية تسهل ترجمتها إلى "عدم الدقة" [inexactness]، وفي موضعين، وبقصد يختلف اختلافًا طفيفًا، استخدم كلمة "اللاتحددية" [indeterminancy]. غير أنه تحت ضغوط لا تقاوم من أستاذه ومشرفه العلمي نيلز بور [Niels Bohr]، أكره هايزنبرج على إضافة ملحق طرح فيه تعبيرًا جديدًا على المشهد: الريبة [اللاتيقن]. وهكذا أصبح اكتشاف هايزنبرج يعرف بشكل راسخ بمبدأ الريبة.

لم يكن هذا التعبير الأكثر مناسبة. الحال أن الريبة لم تكن عام 1927 جديدة كلية على العلم. لقد كانت النتائج التجريبية تعاني دومًا من عوز في الإحكام. جودة التنبوءات النظرية إنما تكون بجودة الافتراضات التي تتكئ عليها. إبان السعي أشواطًا بين التجربة والنظرية، الريبة محدد ما يتوجب على العالم القيام به. تستدعي التجارب باستمرار تفاصيل أكثر دقة، فيما تخضع النظريات لعمليات تعديل وتنقيح مستمرة. وحين يحسم العلماء أمر مستوى من الخلاف، فإنهم ينتقلون إلى مستوى آخر. الحال أن الريبة، والتعارض، وعدم الاتساق من ضمن تجهيزات كل تخصص علمي حيوي.

وفق هذا، لم يكن هايزنبرج أول من طرح الريبة في العلم. ما قام بتغييره، بطريقة معمقة، هو طبيعة هذه الريبة ومعناها. لقد بدا العلم دومًا عدوًا يمكن قهره. منذ كوبرنيكس وجاليليو، كبلر ونيوتن، تطور العلم عبر تطبيق الاستدلال المنطقي على

الحقائق والبيانات التي يمكن التحقق منها. لقد قصد من النظريات، المعبر عنها بلغة الرياضيات الصارمة، أن تكون تحليلية ودقيقة. إنها تؤمّن نسقًا، بنية، تصورًا شاملاً يستبدل العقل والسبب بالغموض والمصادفة. في العالم العلمي، لا شيء يحدث ما لم يكن هناك شيء يجعله يحدث. ليست هناك تلقائية، ولا نزوية. قد تكون ظواهر الطبيعة معقدة بشكل استثنائي، ولكن يتعين على العلم في نهاية المطاف أن يكشف النقاب عن النظام والقابلية للتنبؤ. الحقائق حقائق، والقوانين قوانين، ويستحيل أن تكون هناك استثناءات. إن طواحين العلم، مثل ما حلت محله، سوف تطحن دقائق متعاظمة الصغر، وعلى نحو لا يقل كمالاً.

لقرن أو قرنين، بدا أن الحلم قابل للتحقق. وإذا كان في وسع علماء جيل ما، يراكم على الجيل الذي سبقه، أن يروا أنهم لم يحققوا بعد مثالهم، فإنه في وسعهم أيضًا أن يعتقدوا بأنه سوف يكون بمقدور أخلافهم أن يكملوا المهمة. لقد اقتضت قوة العلم حتمية التقدم. سوف يصبح العلم أكثر مهابة وأوسع نطاقًا، لكنه سوف يصبح في الوقت نفسه أكثر تفصيلاً وتدقيقًا. لقد كانت الطبيعة قابلة لأن تعرف ـ وإذا كانت قابلة لأن تعرف، فمحتم أن يأتي اليوم الذي تعرف فيه.

في القرن التاسع عشر، أصبحت هذه الرؤية التقليدية، التي انبثقت عن العلوم الفيزيائية، النموذج المهيمن على كل صنوف العلم. علماء الجيولوجيا [علم طبقات الأرض]، علماء البيولوجيا [علم الأحياء]، وحتى أول أجيال علماء النفس، تصوروا العالم الطبيعي برمته في شكل آلة معقدة لكنها معصومة عن الخطأ. وعلى هذا النحو تطلعت كل العلوم إلى المثال الذي أمّنته الفيزياء. لقد تعينت المهمة في تعريف العلم المعني وفق الملاحظات والظواهر المهيأة للوصف الدقيق ـ أي القابلة لأن يعبر عنها في شكل أرقام ـ ثم العثور على القوانين الرياضية التي تربط هذه الأرقام في نسق ملزم.

لا ريب أن المهمة كانت عسيرة، وإذا حدث أن طموحات العلماء قد روّعتهم، فإن السبب يعود إلى شدة تعقّد الآلة التي كانوا يحاولون تفكيكها وليس لأي سبب آخر. قد تكون قوانين الطبيعة أوسع من أن تقدر عقولهم على سبر غورها. ولعل العلماء سوف يكتشفون أن في وسعهم تدوين قوانين الطبيعة فقط ليكتشفوا عوزهم القدرة التحليلية والحسابية اللازمة للعمل على هذه النتائج. وإذا حدث أن تعثر

مشروع الفهم العلمي المطلق، فلأن العقل البشري لم يكن على مستوى المهمة، وليس لأن الطبيعة لم تكن قابلة للفهم.

هذا ما جعل حجة هايزنبرج مقلقة. لقد استهدفت هشاشة لم تكن موضع اشتباه في صرح العلم- ضعفًا في البنية التحتية، في جزء من الأساس لم يتعرض للفحص لأنه بدا آمنًا على نحو بدهي.

لم يجادل هايزنبرج في كمال قوانين الطبيعة، بل عثر في حقائق الطبيعية نفسها على صعوبات غريبة وتهدد بالخطر. لقد تعلق مبدؤه في الريبة بأكثر أفعال العلم أولية: كيف نحصل على معرفة بالعالم، كيف نحوز على نوع المعرفة الذي نستطيع تعريضه للتدقيق العلمي؟ وفيما يتعلق بمثال الجسيمات الذي عني به، كيف نعرف موضع شيء ما ومدى سرعته؟ لقد كان من شأن هذا السؤال أن يربك أسلاف هايزنبرج. في أي وقت، للشيء المتحرك سرعة بعينها وموضع محدد. ثمة سبل لقياس أو ملاحظة السرعة والموضع. وكلما كانت الملاحظات أفضل، كانت النتيجة أدق. أي شيء آخر يمكن قوله؟

أكثر بكثير، أو هكذا اكتشف هايزنبرج. لقد تم التعبير عن خلاصة ما توصل إليه، الغاية في الثورية والغرابة، بكلمات كادت تصبح شائعة. تستطيع أن تقيس سرعة الجسيم، أو قد تستطيع أن تقيس موضعه، غير أنك لا تستطيع أن تنجز المهمتين معًا. أو: كلما كنت أكثر دقة في معرفة الموضع، غدوت أقل قدرة على معرفة السرعة. أو، بتعبير أقل مباشرة ووضوحًا: فعل الملاحظة يغير الشيء الملاحظ.

ومهما يكن من أمر، بدا في النهاية أن الحقائق ليست الأشياء البسيطة الصلبة التي افترضنا. يسلّم التصور الكلاسيكي للعالم الطبيعي الذي يعتبره آلة ضخمة بقابلية كل الأجزاء العاملة في هذه الآلة للتحديد بدقة لا متناهية، وبأنه بالمقدور فهم روابطها البينية على وجه الضبط. لكل شيء موضعه، وثمة موضع لكل شيء. لقد بدا هذا أساسيًا وجوهريًا في آن واحد. كي تأمل في فهم الكون، يتعين عليك أولاً أن تفترض أن في وسعك التعرف على ماهية كل مكون من مكوناته، قطعة قطعة، والدراية بما يقوم به. يبدو أن هايزنبرج كان يقول إنك لا تستطيع فهم كل ما تود معرفته؛ حتى

قدرتك على وصف العالم الطبيعي مقيدة. وإذا لم يكن يتسنى لك وصفه كما أملت، فكيف لك أن تأمل في استنباط قوانينه.

كان الغموض يلف مضامين اكتشاف هايزنبرج، الذي جاء بعيد تبصر ليس أقل مدعاة للدهشة والإرباك كان طرحه قبل عامين، حين رأى في ومضة رؤية كيفية استحداث نظرية أصبحت تعرف بميكانيكا الكم. وبينما كان سائر عالم الفيزياء يحاول اللحاق، كان هايزنبرج، بصفاء رؤية فتى يافع، يتطلع إلى المضي قدمًا، يعيد كتابة قواعد الفيزياء الأساسية بلغة نظرية جديدة وصعبة لم يكن في وسعه هو نفسه زعم فهمها كاملة. غير أن نيلز بور، المجبول على ردود الفعل البطيئة والمثيرة أحيانًا للسخط، استشعر الحاجة إلى استيعاب الجديد في القديم. لقد اكتشف أن هناك مهمة عسيرة، لكنها أساسية، تتعين في فهم فيزياء الكم الجديدة دون الاستغناء عن النجاح الصعب الذي حقق في العصر السابق. لقد تجادل مع هايزنبرج بشكل مضن حول أفضل سبل تصوير العلم الطالع، الذي ظل موضع خلاف.

غير أن هناك صوتًا آخر شارك في هذا الجدل. حين أعلن هايزنبرج عن مبدئه، كان آلبرت أينشتين [Albert Einstein] قد قارب الخمسين من عمره. كان أحد ثقاة العلم الأبرز؛ يحترم، ويوقر، وإن لم يعد يحظى دومًا بالاهتمام. وفي حين كان العلماء الأصغر سنًا يقومون بالعمل المهم، كان أينشتين يقوم بدور المعلق المستعلي على الجميع. كان هو الآخر، في زمنه، ثوريًا. في عامه العظيم، 1905، أطاحت نظريته في النسبية بالفكرة النيوتونية القديمة القائلة بمكان وزمان مطلقين. الحوادث التي يراها ملاحظ متزامنة تبدو لآخر متتابعة، الواحدة تلو الأخرى. غير أنه قد يتسنى لملاحظ ثالث أن يرى تلك السلسلة المتتابعة معكوسة. لقد استخدم هايزنبرج مبدأ أينشتين الثوري بطريقة مرنة في دعم مبدئه: الملاحظون المختلفون يرون العالم بشكل مختلف.

غير أن أينشتين اعتبر هذا إساءة تأويل بشعة لأعظم إنجازاته. صحيح أن النسبية تسمح بمنظورات مختلفة، غير أن مفاد مجمل نظريته يتعين في كونها سمحت بالمصالحة بين ملاحظات تبدو متناقضة على نحو بمقدور كل الملاحظين قبوله. أما في عالم هايزنبرج، أقلّه وفق فهم أينشتين، فإن فكرة الحقيقة الصادقة نفسها بدت تتفتت في

شكل تنويعة من وجهات النظر غير القابلة للمصالحة. وهذا، فيما يقول أينشتين، غير مقبول إذا كان العلم يعني أي شيء جدير بالثقة. هذا صرع فكري ضار آخر، يحارب فيه هايزنبرج وبور هذه المرة في جبهة واحدة ضد المعلم القديم.

في النهاية، انبثق عن هذا الجدل المتحول ثلاثي الأطراف تعريف عامل عملي لمبدأ الريبة ظل معظم علماء الفيزياء يجدونه مناسبًا وقابلاً بشكل معتدل للفهم - طالما لم يفضلوا التفكر أكثر مما يجب في الصعوبات الفلسفية أو الميتافيزيقية التي لم تحل والتي يثيرها ذلك التعريف. لقد سلّم أينشتين على مضض بصحة النسق الذي طرحه هايزنبرج وبور من وجهة نظر فنية. غير أنه لم يكن في وسعه قبول أنه يقول الكلمة الفصل. لقد ظلت الفيزياء الجديدة عنده، إلى حين مماته، تسوية غير مرضية، إجراءً مؤقتًا يتعين في النهاية تعزيزه بنظرية تنهض على المبادئ القديمة التي تعلّق بها. وهكذا تشبث أينشتين بفكرة مؤداها أن ريبة هايزنبرج إنما تشي بعجز بشري عن فهم العالم الفيزيقي، عوضًا عن أن تكون مؤشرًا على شيء غريب يتعذر الوصول إليه بخصوص العالم نفسه.

نتج عن استهجان أينشتين الشديد لنوع الفيزياء الذي استحدثه بور وهايزنبرج ما شكل في واقع الأمر صراعًا من أجل روح العلم. والآن، وبعد أن انتهت المعركة، يبدو هذا تعبيرًا ميلودراميًا [مبالغًا فيه]. غير أنه في عشرينات القرن الفائت، حين كانت تلك الفيزياء في طور الانبثاق، استبين تمامًا أن أسس العلم الفيزيائي كانت تتعرض إلى فحص وتدقيق غير مسبوقين. لقد تم اكتشاف بعض الصدوع، وبإشراف بور وهايزنبرج على المهمة، أعيد بناء الأسس - أو، كما كان لأينشتين أن يقول، وضعت بعض الدعائم - في حين ظلت البنية الفوقية بدرجة أو أخرى على حالها. إن إعادة التأهيل اللافتة هذه تشكل لب القصة التي يرويها هذا الكتاب. لم تكن هناك، ضمن الشخصيات الرئيسة، أصوات محايدة. أيضًا فإن المسألة لم تتعين في تحديد طرف بشكل واضح قبالة آخر، فالولاءات تتحول، والرؤى تتغير. الراهن أن روح أينشتين المرتابة تظل إلى يوم الناس هذا تحوم فوق الانتصار الظاهري الذي زعمه بور وهايزنبرج.

لهذه القصة المركزية ملحق وتوطئة.

أصبح مبدأ الريبة عبارة جذابة تصف صعوبة عامة، ليس فقط في العلم، تواجه تأسيس معرفة لا تشوبها شائبة. حين يقر الصحفيون أن رؤاهم قد تؤثر في القصص التي يعدون تقارير بخصوصها، حين يأسى علماء الأنثروبولوجيا على أن حضورهم يؤثر في سلوك الثقافات التي يقومون بتقصيها، سوف يكون مبدأ هايزنبرج في متناولهم: الملاحظ يغير الشيء الملاحظ [بالكسر ثم الفتح]. حين يقر منظّرو الأدب أن النص يعرض تنويعة من المعاني، وفقًا على مزاج ومحاباة قراء مختلفين، يكون هايزنبرج مختبئًا في الوراء: فعل الملاحظة يحدد ما يلاحظ وما لا يلاحظ.

هل يتعلق هذا بأية طريقة بالفيزياء الأساسية؟ بالكاد! فلماذا إذن تحمست فروع معرفية أخرى لتبني مبدأ هايزنبرج؟ سوف أقترح لاحقًا أن هذا الضم لفكرة غريبة لا يرجع إلى كون الصحفيين وعلماء الأنثروبولوجيا يتوقون إلى العثور على تبرير علمي مشكوك في أمره لأحكامهم؛ بل لأن مبدأ الريبة يجعل المعرفة العلمية نفسها أقل ترويعًا لغير العلماء، ويقربها من نوع المعرفة الغامضة والمراوغة التي نتشبث بها يوميًا.

غير أن الوصول إلى هذا الجزء من القصة يتطلب أولاً فهم مصادر ريبة هايزنبرج. الثورات العلمية، مثل أي نوع آخر من الثورات، لا تأتي من فراغ؛ بل لديها جذور ومقدمات. الريبة إنما تمثل تتويجا لميكانيكا الكم، التي سبق لها أن أطاحت قبل حلول عام ١٩٢٧ بالكثير من معتقدات فيزياء القرن التاسع عشر الكلاسيكية. غير أن ميكانيكا الكم نفسها كانت استجابة لمشاكل لم تستطع الفيزياء الأقدم التعامل معها. لقد ظل اليقين في العلم دوما مسألة مشحونة، ورغم أن نظرية الكم وريبة هايزنبرج شكلا نتاجًا للقرن العشرين، فإن إرهاصاتهما المبكرة بدأت قبل ذلك بما يقرب من مائة عام. هذا ما يجعل القصة تبدأ في عقود القرن التاسع عشر الأولى.

الفصل الأول

الجسيمات سهلة التهيج

كان روبرت براون [Robert Brown]، وهو ابن كاهن اسكتلندي، نموذج العالم العصامي، الوقور والمجتهد، والحريص حد التطرف. ولد براون عام 1773، ودرس الطب في أدنبرة، ثم عمل عدة سنوات مساعد جراح في كتيبة في فايف شاير. هناك استثمر وقت فراغه في القيام بأعمال قيّمة. ولأنه كان ينهض مبكرًا، علّم نفسه الألمانية (الأسماء وتصريفاتها قبل الإفطار، تسجيل يومياته وتصريف الأفعال المساعدة بعد الإفطار) كي تكون له السطوة على الأدبيات الألمانية التي لا يستهان بها في علم النبات، التخصص الذي اختار دراسته. في زيارة إلى لندن عام 1798، قابل هذا الشاب الاسكتلندي عالم النبات العظيم السير جوزيف بانكس [Joseph Banks]، رئيس "الجمعية الملكية" [Royal Society]، وقد أثار إعجابه إلى حد أنه أبحر، وفق توصية من بانكس بعد مقابلته بثلاث سنوات، في رحلة طويلة إلى أستراليا؛ حيث عاد عام 1805 محملاً في سفينته بما يقرب من أربعة آلاف عينة من النباتات الغريبة مرتبة بشكل رائع. أمضى براون السنوات السبع التالية يجتهد في وصف هذه العينة وتصنيفها وفهرستها، فيما كان يعمل في الوقت نفسه مكتبيًا ومساعدًا شخصيًا لبانكس. شكلت مجموعة براون الأسترالية النفيسة، صحبة مجموعة بانكس اللافتة، الجزء الرئيس في قسم النبات في "المتحف البريطاني" [British Museum]، الذي أصبح براون أول قيّم محترف عليه. لقد كان، على حد تعبير زائر لمنزل بانكس في لندن، "فهرسًا يسعى على قدمين لكل كتاب في العالم." حبوب اللقاح

قبل زواجه، أمضى تشارلز داروين [Charles Darwin] الكثير من أيام الآحاد مع روبرت براون العالم المثقف. يصف داروين رجلاً متناقضًا، ذا علم غزير لكنه

يميل بشكل قوي إلى الحذلقة، كريمًا بسبل ما، لكنه كثير التذمر والشكوك بسبل أخرى. وفيما يضيف دارون: "لقد بدا لي لافتًا أساسًا بسبب تفاصيل ملاحظاته ودقتها اللامتناهية. لم يحدث أن أفصح لي عن أية رؤى علمية مهمة في علم الأحياء. كان يفيض عليَّ بعلمه بطريقة لا تحفظ فيها، غير أنه كان غيورًا بشكل غريب في بعض الأحيان." لقد اشتهر براون، حسب دارون، برفضه إعارة عينات من مجموعته الهائلة، حتى العينات التي لا يملكها أحد سواه والتي كان يعرف أنه لن يفيد منها هو نفسه.

من المفارق إذن أن يذكر اليوم هذا الرجل الجاف والحذر أساسًا بوصفه ملاحظ ظاهرة مثيرة، الحركة البراونية، التي مثلت اقتحامًا نزويًا للعشوائية وعدم القابلية للتنبؤ لقصر العلم الفيكتوري الأنيق. الحال أن إمعان ملاحظات براون في التدقيق هو ما جعل مضامين الحركة البراونية خطرة إلى هذا الحد.

في يونيو 1827، بدأ براون في دراسة حبوب لقاح الإقريلقية، Clarkia pulchella، وهي زهرة برية، شهيرة الآن عند البستانيين، اكتشفها مروذر لويس [Meriwether Lewis] في آيدهو عام 1806، لكنه أسماها على اسم وليام كلارك [William Clark] الذي كان يشاركه اكتشافاته. تحديدًا، أراد براون أن يدقق في شكل وحجم جسيمات حبوب اللقاح، آملاً أن يلقيا الضوء على وظيفته وعلى الطريقة التي يتفاعل بها مع أجزاء أخرى من النبات كي تقوم بدورها التكاثري.

كان براون قد حصل على مجهر [ميكروسكوب] حديث صمم بطريقة محسنّة. كانت عدساته المركبة قادرة على محو آثار أطياف لون قوس قزح التي كانت تؤثر سلبًا في رؤية حواف الأشياء حال استخدام أجهزة أكثر بدائية. أصبحت الأشكال الهلامية لحبوب اللقاح في عيون براون واضحة، حوافها محددة تمامًا. غير أن صورها لم تكن كما يجب. لقد ظلت حبوب اللقاح تتحرك، وتهتز باستمرار صوب هذا الاتجاه أو ذاك؛ كانت دقائقها تومض وترتعش، تغير اتجاهها بطريقة سريعة وغريبة الأطوار عبر مجال رؤية المجهر.

كان من شأن هذه الحركة المتواصلة أن تعقّد الملاحظات التي خطط لها براون، غير أنها لم تكن مفاجئة كثيرًا. فقبل أكثر من قرن ونصف، قام أنتوني فان ليوين هوك [Antony van Leeuwenhoak]، وهو تاجر ألبسة من ديلفت، بهولندا، بإثارة دهشة الأوساط العلمية وبهجتها حين وصف كائنات حية دقيقة ذات أشكال غريبة لا حصر لها كشف عنها مجهره البدائي في قطيرات أخذت من بركة ماء، وفي طبقة كشطت من أسنان رجل مسن، وحتى في مزيج من الماء والفلفل المستخدم في البيوت. "كانت حركة معظم هذه الدقائق الحية في الماء متنوعة، تهتز إلى أعلى وإلى أسفل، وتدور بسرعة تجعل رؤيتها ممتعة"، أو هكذا قال ليوين هويك مبتهجًا. غير أن اكتشافه لم يثر المزيد من التقصي العلمي فحسب؛ بل جعل بعض المواطنين الأثرياء يشترون مجاهر كي يضعوها في حجرات الاستقبال في البيوت وقاعات الرسم التي تخصهم، بحيث يثيرون دهشة ضيوفهم بعجائب الطبيعة الجديدة هذه.

كان لدى بعض الدقائق الحية شعور صغيرة أو زوائد زعنفية تمكنها من السباحة. بعض آخر منها كان يتلوى مثل صغار ثعابين الماء. يسهل تخيل أن حركتها كانت موجهة بطريقة أولية بعض الشيء. في المقابل، كانت حبوب اللقاح بسيطة في شكلها، ولم تكن لديها أطراف متحركة. غير أن دقائقها ظلت كائنات عضوية على نحو لا سبيل لإنكاره. لقد بدا لبراون أنه من الوجيه افتراض أن حبوب اللقاح - خصوصًا لكونها الأجزاء الذكورية من جهاز النبات التكاثري - قد تحوز نوعًا من الأرواح الحيوية التي تدفع بها إلى التحرك على هذا النحو المسلي والغامض.

غير أن براون لم يكن ليثق في فروض مبهمة من هذا القبيل. الملاحظات، لا التخمينات، هي مكمن قوته. وبعد أن فحص حبوب اللقاح في نباتات أخرى، اكتشف أنها تهتز بطريقة مشابهة. غير أنه قام بعد ذلك بفحص أجزاء دقيقة من الأوراق والجذوع فوجد أنها تتحرك هي الأخرى بسرعة فائقة وبشكل محير تحت عيون مجهره.

أسرت انتباهه "هذه الحقيقة غير المتوقعة لما يبدو فعالية حيوية"، ما حتم عليه أن يعيد النظر. حصل على حبوب اللقاح من عينات من النباتات الجافة، مضى على بعض منها أكثر من قرن، كما كشط أجزاء دقيقة من قطعة من الخشب المتحجر. كل هذه الدقائق كانت حية، لكنها ماتت منذ زمن طويل، و لم تعد فيها جذوة حياة. غير أنه حين فحصها عبر المجهر، وجد أنها تتحرك هي الأخرى حركة غير سوية. فحص مواد ليست عضوية إطلاقًا، قطعًا صغيرة من مختلف أنواع الحجر وقطعة من زجاج النوافذ العادي، فوجدها تتحرك هي الأخرى. ولكي يخضع الأمر إلى أقصى درجات التقصي، كشط مسحوقًا من قطعة في تمثال أبي الهول، سهل عليه الحصول عليه لكونه القيّم على المتحف البريطاني؛ حيث لا مراء وفق مصدره في أنه لا حياة فيه.

وبعد أن وضع المسحوق في ماء تحت عدسات مجهره، وجد أن الغبار الذي يرجع إلى عهد أبي الهول يتراقص مثل أي شيء آخر.

يقر براون بأنه ليس أول من رأى أشياء تتحرك على هذا النحو تحت المجهر. فقبل عدة سنوات، فيما يقول، قام السيد باي ووتر [Bywater] من ليفربول، بفحص أجزاء من مواد عضوية وغير عضوية، فلاحظ "الجسيمات الحية سهلة التهيج" التي تنثرها جميعها. غير أن براون قد أثبت، باستخدام تنويعة من التجارب المبدعة والبارعة، أن حركة كل هذه الأجزاء الدقيقة المتواصلة ليست "الحركة الحية" التي رآها ليوين هويك وآخرون، وليست حركة ناجمة عن اهتزاز أو اضطراب السوائل التي وضعت فيها تلك الأجزاء، نتجت عن الحرارة أو تأثيرات كهربية أو مغناطيسية.

كان الأمر متناقضًا ومحيرًا. يستبان أنه لم يكن في وسع جسيمات الغبار الميتة أن تتحرك بإرادتها، كما أنه لم يكن هناك أي تأثير خارجي يدفعها للحركة. غير أنه اتضح أن جميعها تتحرك. براون نفسه لم يحاول طرح تفسير. لقد كان عالم نبات حذرًا، ولم يكن فيلسوف طبيعة، وكما قال تشارلز داروين، "لقد مات الكثير معه، بسبب شدة خشيته من ارتكاب أخطاء".

حين واجه العلم هذا المأزق المستحيل، تبنى مسلكًا حكيمًا؛ لقد تجاهل الحركة البراونية عدة عقود. لم تحظ أهميتها العميقة بالاهتمام لأن الظاهرة تجاوزت كثيرًا نطاق الفهم العلمي. لم يكن هناك من سبيل حتى للشروع في فهم معناها. كل من استخدم المجهر كان يعلم بأمر الحركة البراونية، أقلّه بوصفها شيئًا غاية في الإزعاج؛ غير أن قليلاً هم الذين اطلعوا على ما قاله براون نفسه عنها. لقد ظل معظم علماء النبات والحيوان يتشبثون بفكرة أنها تجلّ لأرواح حية، متجاهلين بشكل مريح برهنة براون على أن الجسيمات الخاملة تتحرك بالقدر نفسه تقريبًا. أو أنهم قرروا أن عيناتهم قد تأثرت بالحرارة أو الاهتزاز أو باضطراب كهربي، مغفلين بذلك أن تجارب براون استبعدت هذه التأثيرات قدر ما استبعدت غيرها.

لم يبدأ العلماء في تحسس طريقهم نحو فهم الظاهرة إلا بعد رحيل براون عام 1858. وكما يحدث غالبًا في العلم، لم يكن ليتسنى فهم الملاحظات إلا بعد أن يبزغ بصيص نظرية تمكّن من فهمها. لم تكن النظرية في هذه الحالة فكرة جديدة بل فكرة جد قديمة تسنى للعلم في النهاية أن يستنبط منها معنى مناسبًا.

اعتقد المفكر اليوناني العظيم ديمقريطس [Democritus]، الذي ازدهر نشاطه حوالى عام 400 ق.م.، أن كل المادة مكونة من جسيمات أساسية دقيقة تسمى الذرات (مشتقة من الكلمة اليونانية atomos، التي تعني "غير قابل للقسمة"). وبصرف النظر عن قدر نبوءة هذا المفهوم من منظور معاصر، فإنه لم يكن فرضًا علميًا بقدر ما كان تصورًا فلسفيًا. ماهية الذرات، شكلها، سلوكها، الطريقة التي تتفاعل بها ـ أشياء لم يكن في الوسع سوى تخمينها. غير أنه تم إحياء الاهتمام بالذرات على يد علماء الكيمياء. في عام 1803، اقترح دالتون [Dalton] في إنجلترا أن قواعد نسب التفاعل الكيميائي ـ مثال أن الهيدروجين والأكسجين يتحدان وفق نسبة ثابتة كي يكونان الماء ـ ناتجة عن أن ذرات المواد الكيميائية ترتبط ببعضها البعض وفق قواعد حسابية بسيطة.

لم تصدّق فكرة الذرات بين ليلة وضحاها. في وقت تأخر حتى عام 1860، عقد مؤتمر دولي في كارلسترخ بألمانيا لمناقشة فرض الذرات. آنذاك، كان هناك تفضيل لهذا الفرض، غير أنه كانت هناك أيضًا معارضة قوية. لقد أبدى عدد كبير من علماء الكيمياء المبرزين استعدادًا لاعتبار قوانين التركيب الكيميائي قواعد أساسية في حد ذاتها، و لم يجدوا مبررًا للخوض في تخمينات متطرفة حول الجسيمات غير المرئية.

أوجست كيكيول [August Kekule]، عالم الكيمياء الألماني الذي اشتهر باقتراح الشكل الحلقي لجزيء البنزين حين غلب عليه النعاس في كرسيه أمام الموقد وحلم بثعابين تطارد ذيولها، طرح رأيًا أكثر غموضًا. لقد قبل وجود الذرة الكيميائية، وفق الرؤية التي اقترحها دالتون وآخرون، ولاحظ أن بعض علماء الفيزياء، لأسباب تخصهم، قد بدؤوا مؤخرًا يجادلون دفاعًا عن الذرات. ولكن هل كانت ذرة الكيميائي وذرة الفيزيائي الشيء نفسه؟ لقد اعتقد كيكول خلاف ذلك، وعلى أقل تقدير فإنه ذهب إلى أن مثل هذا الحكم سابق لأوانه.

تكاد الذرة تكون عند عالم الكيمياء شيئًا يختص بخواص ملموسة. إنها تحوز بطريقة ما خصائص المادة التي تمثلها، ويمكنها أن تلتصق أو تنفصل عن ذرات أخرى، وفقًا على خصائص كل منها. لقد كاد علماء الكيمياء يتصورون أن الذرات في الجسم ثابتة لا تتحرك، تشغل الفراغ كما برتقالات في قفص.

غير أن علماء الفيزياء أفكروا بطريقة مختلفة. لقد كانت ذراتهم كريات صلبة دقيقة، تحلق بسرعة عالية في مكان يكاد يكون فارغًا، تتصادم أحيانًا ببعضها البعض فترتد ثانية. كان دور هذه الذرات محددًا. بدءًا من منتصف القرن التاسع عشر تقريبًا، شرع عدد من علماء الفيزياء من ذوي الميول الرياضية في مطاردة فكرة مفادها أنه بمقدور حركة الذرات المسعورة أن تفسر ظاهرة الحرارة التي كان يكتنفها الغموض. تكتسب الذرات في حجم من الغاز طاقة، تجعلها تتحرك بسرعة أكبر، وتتصادم ببعضها البعض وبجدران الوعاء بطريقة أكثر عنفًا. هذا ما يجعل الغاز يتمدد حين يسخن، ويمارس قدرًا أكبر من الضغط. وفق هذه النظرية التي تعرف باسم النظرية

الحركية في الحرارة، الحرارة ليست سوى طاقة الحركة الذرية. مفاد المضمون الأكثر عمقًا هو أنه يتعين على فيزياء الحرارة والضغط على المستوى الكبير أن يلزما ضرورة عن سلوك الذرات على المستوى الصغير حين تتحرك وتصطدم على نحو يمتثل تمامًا لقوانين الحركة النيوتونية.

هكذا ذاع كليشيه للذرة، أصبح موضع ثقة، يصورها في شكل كرة بليارد صغيرة، صلبة لكنها خاملة [عاجزة عن التفاعل الكيميائي مع مواد أخرى]، تتصادم بطريقة عشوائية. مسألة ما إذا كان هذا يتعلق بالكيمياء مسألة مختلفة. لقد قبل علماء الفيزياء إمكان أن تكون ذرات غاز ما أخف أو أثقل من غيرها، ولكن السبب الذي جعل الغازات تحوز خصائص متفردة لم يكن ليشغلهم.

باختصار، لم تكن الذرة في تلك الأيام فرضًا موحدًا بأي شكل، وإذا لم يكن لدى علماء الفيزياء والكيمياء الكثير ليقولونه لبعضهم البعض، فإن المسافة التي تفصل بين علماء المجهر وعلماء الأحياء كانت أبعد. لقد جاءت النظرية الحركية بتعقيدات رياضية نفّرت الجميع باستثناء قلة قليلة، في حين أنه يرجح أن عالم الرياضيات النمطي، حتى إذا كان مدركًا للحركة البراونية، يفترض أنها ظاهرة تعوزها الأهمية لا تشغل سوى علماء النبات.

على ذلك، كان على إحداث الارتباط أن ينتظر اكتشافًا. جاءت أول تلميحة من لودفيج كرستيان فاينر [Ludwig Christan Wiener]، الذي أمضى معظم حياته يدرّس الرياضيات والهندسة في الجامعات الألمانية. في عام 1863، وبعد أن أجرى تجربة أكدت كل شيء اكتشفه براون منذ زمن طويل، شعر فاينر أن بمقدوره أن ينشر اقتراحًا مثيرًا وإن ظلّ تخمينيًا. إذا كان السائل الذي تتحرك فيه الجسيمات البراونية في واقع الأمر خليطًا من الذرات النشطة، فإن هذه الذرات سوف تصطدم بالجسيمات الموجودة في السائل من كل الاتجاهات. التهيج الغريب والمتواصل الذي ينتاب الذرات غير المرئية، فيما جادل، سوف يجعل الجسيمات المرئية الأكبر حجمًا ترنح بطريقة لا يمكن توقعها.

وعلى نحو يتسق مع التاريخ المتشابك لهذا الموضوع، لم يكد اقتراح فاينر الجريء يجذب أي انتباه.

انتهى أمر الاستمرار في البحث عن تصور علمي للحركة البراونية عند سلسلة من الكهان اليسوعيين الفرنسيين والبلجيكيين. خلال القرن التاسع عشر، واصل العديد من القساوسة الانشغال بشكل نشط ومفيد بالعلوم الملاحظية والقائمة على جمع الشواهد: علم النبات، الجيولوجيا، علم الحيوان، وما شابه ذلك. حدث الارتباط الكهنوتي في مدلمارش Middelmarch، حين قام رجل العلم المصر على إلحاده الدكتور ليدجيت [Lydgate] بزيارة الكاهن ذي اللاهوتية المعتدلة، فيربرذر [Farebrother] ووجد أن لدى هذا الكاهن مجموعة مثيرة للإعجاب من مواد التاريخ الطبيعي، تشمل عينات وكتبًا ومجلات. ولأنه كان سعيدًا بمواجهة زميل من فلاسفة الطبيعة، عرض أن يري فيربرذر عددًا من أشيائه، خصوصًا "عمل براون الجديد - Microscopic Obseravations on the Pollen of Plants [ملاحظات مجهرية في طلع النباتات]- إن لم يكن سبق لك الحصول عليه".

أكثر من ذلك، كان لدى اليسوعيين والكثير من رجالات الكنيسة دراية واسعة ومحكمة بشكل مدهش في الفلسفة والمنطق وحتى الرياضيات. لقد كان هؤلاء الرجال مهيئين بشكل فردي لتناول مشاكل لنا أن نصفها اليوم بأنها عبر–تخصصية، لكنها كانت آنذاك مجرد جزء من المشروع الواسع الذي يسمى العلم. في المقابل، وبدءًا من النصف الثاني من القرن التاسع عشر، كان علماء الفيزياء الرياضية في طريقهم إلى أن يصبحوا سلالة منعزلة، تقطن تخصصها المبهم، وهو مجال كان حتى القادرين على فهم الرياضيات يخشون بشكل متزايد الخوض فيه.

بحلول سبعينيات القرن الثامن عشر، كان هذا التقسيم متزايد الحدة يعني أن عددًا من العلماء قد أدرك التفسير الكيفي الصحيح للحركة البراونية، لكن وسائل التعبير الكمي المقنعة عن فرضهم لم تكن ميسرة لهم. يصعب بشكل غريب أن تجد من يرغب في عزو الفضل إلى نفسه في العثور على إجابة. مثال ذلك أننا نجد

في عدد صدر عام 1877 من Monthly Microscopic Journal اللندنية، أن الأب جوزيف دلسو، سي.جي. [Joseph Delsaulx، S.J.]، ينسب إلى زميل لم يذكر اسمه اقتراح أن الحركة البراونية ناتجة عن حالة التهيج المستمرة التي تقوم بها جسيمات صغيرة والناجمة عن الذرات أو الجزيئات التي تكون السائل. (حينها كان سبق لعلماء الكيمياء أن ميزوا بين الذرات، التي اعتبرت أساسية، والجزيئات، وهي مركبات من الذرات).

بعد ثلاث سنوات، يذكر الأب جي. ثريون، س.جي [J. Thirion، S.J] في مقالة نشرت في Revue des Questions Scientifiques، أنه رأى قبل سنوات مقترحًا شبيهًا مدونا في ملاحظات مختبرية لم تنشر(!) ينسب إلى

"الأب كاربونيل [Fr. Carbonelle]، وهو عالم يعرفه قراؤنا جيدًا، بيّن له زميل آخر، الأب رينارد [Fr. Renard]، أول مرة حركة libelles المثيرة". إن هذه الـ libelles [المظاريف]، التي أفادنا ثريون بتفسيرها، بقع داكنة مجهرية ترى في حزم صغيرة من السائل وقد وقعت في شرك عينات من الكوارتزات. الحال أنها فقاعات صغيرة من الغاز أمسك بها في هذه الضمينات السائلة؛ وهي تتحرك بالطريقة التي أصبحت الآن مألوفة. أشار الأب دلسو أيضًا إلى الـ libelles، مضيفًا أنه بحسبان أن الكوارتز معروف بقدمه، فإن هذا مثال على حركة براونية لا بد أنها كانت مستمرة دون أن تهدأ لملايين السنين. يتضح، فيما يقول، أنه ليست هناك علة خارجية مسؤولة عنها. محتم أن ما بينه الأب رينارد للأب كاربونيل ناتج، فيما يؤكد الأب دلسو، عن حركة الجزيئات المتواصلة.

كان هذان الكاهنان في الطريق الصحيح، غير أن افتقارهم للدراية بالرياضيات الحديثة حال دون إحراز المزيد من التقدم. اقترح دلسو بشكل مبهم أنه يتعين على القيمة الملاحظة من الحركة البراونية ـ المسافة التي تقطعها الجسيمات، وقدر سرعتها في كل حركة ملتوية تقوم بها ـ أن ترتبط بما أسماه "قانون الأعداد الكبيرة." لقد اتضح آنذاك أن جزيء السائل أصغر بكثير من أن يمكّن حالة صدام واحدة مع جسيم

براوني من أن تحدث حركة قابلة لأن تلاحظ. عوضًا عن ذلك، فإن ما يحدث هو أن الجزيئات تتصادم بشكل متواصل بالجسيم من كل الاتجاهات، ولكن ليس على نحو غير منتظم تمامًا. التغيرات التي تطرأ على قوة التصادم في أطراف مختلفة من الجسيمات البراونية تجعلها تهتز؛ وفي الوقت نفسه، كلما كان عدد الجزيئات المعنية كبيرًا، مالت حالات الصدام العشوائية شطر إلغاء بعضها البعض، ما يجعلها أقل حركة. يتعين من حيث المبدأ على "قانون الأعداد الكبيرة، الذي يريد منه دلسو تضمين نوع من الاستدلال الإحصائي، أن يربط مقدار الحركة البراونية بحجم وعدد وسرعة الجزيئات في السائل. غير أنه لم يكن لديه أكثر من هذا ليقوله.

بعد عشر سنوات، قام عالم فرنسي، لم يكن كهنوتيًا، هو لوي–جورجيس جوي [Louis–Georges Gouy]، بإجراء سلسلة من التجارب المحكمة على الحركة البراونية، وصفها بشكل مناسب بعبارة "une trepidation constante et caracterstique" [اضطرابات مستمرة ومميزة]. لقد علّق بقوله إنه يبدو حتى الآن، بعد ستين عامًا من أعمال براون الحاسمة، أن مؤدى الرأي السائد هو أن تلك الحركة "عرض ناتج عن بعض التهيج الخارجي". ولكن، وكما يضيف (مكررًا ما سبق أن قاله براون وفاينر ومختلف اليسوعيين)، فإن الوضع ليس على هذا النحو. لقد بينت تجاربه ـ مرة أخرى ـ أن الحركة تحدث في كل أنواع الجسيمات في مختلف أنواع السوائل. إنه لم يستطع العثور على أي جسيم لا يتحرك. وهكذا خلص، كما خلص كثيرون قبله، إلى أن النشاط الجزيئي هو السبب.

غير أنه ذهب إلى أبعد من ذلك. لقد أكد أولاً لقرائه أن الحركة البراونية ليست، كما اقترح البعض، نوعًا من الحركة المستديمة، التي تناقض بوضوح قوانين الديناميكا الحرارية المكتشفة مؤخرًا. حين تتحرك الجزيئات، فيما فسر جوي، تصطدم ببعضها البعض، تتبادل الطاقة، بحيث يبطئ بعضها قليلاً، ويسرع بعض آخر منها قليلاً ـ ولكنها تظل دائمًا تتقاسم مقدار الطاقة الكلي. ليست هناك مشكلة هنا. بعد ذلك لاحظ أن التقدير المعد مؤخرًا يجعل معدل السرعة النمطية للجزيئات يبلغ 100 مليون ضعف السرعة التي تبدو بها حركة الجسيمات البراونية. مرة أخرى، ليست

هناك مشكلة هنا: إذ بمقدور "قانون الأعداد الكبيرة" أن يفسر هذا الأمر. غير أنه، شأن دلسو، لم يستطع أن يؤمّن حسابات محددة تربط بين حجم الجسيم، عدد جزيئاته، أو عدد المرات التي يقصف بها من قبل جزيئات السائل، والطريقة التي يتحرك بها.

يستبان أن الحركة البراونية، ظاهرة إحصائية: الحركة العشوائية في ظاهرها، وغير المتوقعة، التي تقوم بها جسيمات دقيقة تعكس بطريقة ما متوسط أو مجمل حركة الجزيئات غير المرئية. قد لا يكون في الوسع طرح تفسير تفصيلي دقيق لحركة الجسيم البراوني على النحو الذي يتحرك به، غير أنه يتعين على المعلمات العامة لحركته أن تلزم عن قياس إحصائي مناسب لحركة الجزيئات غير المرئية.

على ذلك، لم تكن لدى العدد القليل من البحاث الذين أدركوا هذا الرابط الوسائل المناسبة لجعل تنظيرهم دقيقًا من وجهة نظر رياضية، وقد فشلوا في رؤية الأحجية المفهومية التي أثيرت، ربما لأنهم لم يستطيعوا تأمين حساب محدد. إذا كانت الحركة الأساسية التي تقوم بها الجزيئات تتبع بشكل منظم عن القواعد النيوتونية الخاصة بالسبب والنتيجة، بالقابلية التامة للتنبؤ، فكيف تفضي إلى ظاهرة يبدو أنها تثبت أعمال المصادفة؟ غير أن هذه المتاهة هي على وجه الضبط ما سوف يجد الأشياع الأقدر للنظرية الحركية أنفسهم ملزمين بمواجهتها.

الفصل الثاني

الأنتروبيا تسعى للقدر الأعظم

في حديثه عن الحركة البراونية عام 1889، عبّر لوي-جورجيس جوي عن حيرته لكون "هذه الظاهرة لم تكد تأسر إلا بالكاد انتباه علماء الفيزياء". من ضمن الذين أخفقوا في فهم أهميتها، فيما يزعم، عالم الفيزياء الاسكتلندي جيمس كلرك ماكسويل [James Clerk Maxwell]، الذي يمكن أن نجادل بأنه أبرز منظري القرن التاسع عشر، والذي يبدو أنه اعتقد أنه "في حال تعريض [الجسيمات البراونية] ... إلى مجهر أكثر دقة، لن تكشف إلا عن اتساق أكمل". بتعبير آخر، فإن نظرية أفضل في علم البصريات سوف تخلصنا من هذا الإزعاج.

لسوء الحظ أن جوي، كما هو الحال غالبًا في تلك الأيام، لم يوثّق مصدر حكم ماكسويل، ونحن نظل نجهل إلى يومنا هذا ما إذا كان اتهامًا صحيحًا. على ذلك، من المؤكد أنه لا شيء في أعمال ماكسويل المنشورة يشير إلى أنه رأى في الحركة البراونية ما يشي بالتركيب الجزيئي للغازات والسوائل. الحال أن عدم اهتمامه بهذا الأمر مفاجئ بوجه خاص لأن ماكسويل أول من استخدم الأسلوب الإحصائي في حل مشاكل في علم الفيزياء، كما أنه أسهم لاحقًا في تطوير النظرية الحركية في الحرارة على نحو يفي استحقاقات رياضية دقيقة.

منذ منتصف القرن السابع عشر، استنبط بليز بسكال [Blaise Pascal]، وبيير دي فيرمات [Pierre de Fermat]، وآخرون قوانين بسيطة في الاحتمال الرياضي تحكم مختلف ألعاب الكوتشينة والنرد، غير أن بقاء هذه الأفكار حبيسة في صالات المقامرة استغرق وقتًا طويلاً. في عام 1831، أعد عالم الرياضيات البلجيكي أدولف كويتلي [Adolf Quetelet] جداول لمعدلات الجريمة في فرنسا حسب أعمار المجرمين وجنسهم [من حيث الذكورة والأنوثة] وتعليمهم، ومناخ مشهد الجريمة، ووقت حدوثها في أيام السنة، وقد بشّر هذا، لحسن الحظ أو لسوئه، بنشر تطبيق الأساليب الإحصائية في العلوم السكانية والاجتماعية.

بعد حوالى ثلاثين سنة، استحدث ماكسويل متأثرًا بقراءة أعمال كويتلي طريقة بارعة في إثبات وجوب أن تكون مادة حلقات زحل غبارية. بعد أن تصور الحلقات مجموعات من جسيمات صغيرة تحكمها جاذبية زحل، أعد ماكسويل وصفًا إحصائيًا يسمح للجسيمات بنطاق من الأحجام والسرعات المدارية. وبتطبيق تحليل رياضي قياسي على هذا النموذج، أثبت أن حفاظ الحلقات على شكلها لمدة طويلة يحتم وقوع أحجام الجسيمات ضمن نطاق محدود بعينه.

بعد ذلك بقليل، تبين لماكسويل أن بمقدوره استخدام أساليب مماثلة في وصف الذرات السريعة والمتصادمة التي تشكل حجمًا من الغاز. لقد وجد علماء الفيزياء أنفسهم ملزمين بتناول مسائل الإحصاء والاحتمال بجدية في سياق فهم طبيعة الحرارة. غير أنه كان هناك منذ البداية شيء مقلق ، يكاد يشكل تناقضًا ذاتيًا، بخصوص هذا الأمر.

إذا كانت الحرارة مجرد هيجان جماعي تقوم بها الذرات، فإنه يتعين على فيزياء الحرارة أن تلزم في النهاية عن قوانين نيوتن في الحركة مطبقة على هذه الذرات. يتعين على حالات التصادم الذرية أن تكون قابلة للحساب بقدر ما تقبله نظائرها

التي تحدث على طاولة البليارد، ما يعني وجوب أن يكون سلوك الحرارة قابلاً للتنبؤ على نحو مشابه. إن هذه الرؤية في كلية علم العلم، التي يتعين وفقها على كل جسيم في الكون أن يمتثل لقوانين صارمة وعقلانية، تجد صياغة لها في كلمات شهيرة قالها ماركيز دي لابلاس [Marquis de Laplace]، أحد أبرز مطوري النيوتونية في أرقى صورها الرياضية في القرن الثامن عشر:

لنا أن نعتبر الوضع الراهن للكون نتيجة لماضيه وسببًا لمستقبله. المفكر الذي يعرف في كل لحظة كل القوى التي تبث الحياة في الطبيعة والمواضع المتبادلة التي تتخذها الكائنات التي تتألف منها هذه الطبيعة، إذا كان عالمًا بما يكفي لتحليل البيانات، سوف يستطيع أن يكثف في معادلة واحدة حركة أجسام الكون الأعظم وحركة أخف ذراته؛ عند هذا المفكر، لا شيء موضع ارتياب، والمستقبل، مثل الماضي، سوف يكون ماثلاً أمام عينيه.

لا شيء موضع ارتياب: هذا هو الأمر الحاسم. بإعادة صياغة عبارة فرنسي آخر، نستطيع أن نقول: Tout comprenre c'est tout predire؛ أن تفهم كل شيء هو أن تتنبأ بكل شيء. عن مثل هذه المزاعم الكبيرة تصدر كل الكليشيهات المألوفة التي تعتبر العالم آلة، والكون شيئًا يدور على طريقة الساعة، وكل العلم على أنه في النهاية حتمي لا يقف في طريقه شيء.

من منحى آخر، وكما لم يلبث علماء الفيزياء أن لاحظوا؛ فإن تحقيق أي أمل في القيام فعلاً بحساب السلوك الفردي الذي تقوم به كل ذرة أو جزيء في حجم من الغاز ليس فقط مستحيلاً بل منافيًا للعقل. (بنهاية النصف الثاني من القرن التاسع عشر، كان لدى العلماء فكرة جيدة تمامًا عن قدر صغر الجزيئات ومن ثم عددها الهائل. دورق المختبر المليء بالماء يحتوي على ترليون ترليون منها). كي ينجز علماء الفيزياء أي شيء عملي عبر التنظير لحشد كبير من الذرات والجزيئات، يتعين عليهم اللجوء

إلى أوصاف إحصائية لسلوكها والتخلي كلية عن هدف المعرفة الكاملة الطوباوي. لم يكشف هذا الحل الوسط عن كونه مصدر إزعاج قدر ما فعل في قانون الديناميكا الحراري سيئ السمعة ـ القانون الخاص بالأنتروبيا [مقياس للطاقة غير المستفاد منها في نظام دينامي حراري]، والنزاع بين النظام والفوضى.

بداهة، تنتقل الحرارة من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة، وليس العكس. Entrtopie strebt ein Maximum zu [الأنتروبيا تسعى للقدر الأعظم]، فيما أعلن عالم الفيزياء الألماني ردولف كلوسيوس [Rudolf Clausius] عام 1865، مستحدثًا كلمة جديدة. يتحقق هذا القدر الأعظم حين تنشر الحرارة نفسها بالقدر المتساوي والمنتظم الممكن. ضع قطعتي ثلج في مشروب صيفي. سوف تنتقل الحرارة من السائل إلى الثلج البارد، ولذا يذوب الثلج ويصبح المشروب أبرد. أثناء هذه العملية، تزداد الأنتروبيا. لو زاد حجم قطعتي الثلج وبدأ المشروب البارد حولهما في الغليان، لنقصت الأنتروبيا، وهذا ما يحول دونه القانون الثاني.

أيد كلوسيوس وآخرون القانون الثاني قبل أن تفهم طبيعة الحرارة حقيقة. لقد اعتبروا القانون محكمًا ودقيقًا، كما يفترض أن تكون قوانين الفيزياء. تنتقل الحرارة دائمًا من الساخن إلى البارد؛ وليس في وسع الأنتروبيا إلا أن تزداد.

في البداية، بدا أن ملاحظة أن الحرارة ليست سوى حركة ذرات توضح القانون الثاني. إذا خلطنا مجموعة من الذرات سريعة الحركة، ومن ثم الساخنة، مع مجموعة من الذرات بطيئة الحركة، ومن ثم الباردة، سوف نفهم كيف تؤدي حالات الصدام العنيفة التي تحدث بين الذرات إلى التقليل من حركة السريع منها وزيادة سرعة البطيء، إلى أن يتحرك الجميع، في المتوسط، بالسرعة نفسها. آنذاك سوف تكون درجة الحرارة واحدة في كل مكان، وتتعاظم الأنتروبيا على النحو الذي يجب. العملية العكسية ـ

إصباح الذرات السريعة أكثر سرعة، بحيث تأخذ طاقة من الذرات البطيئة، التي تغدو أشد بطئًا ـ لا تبدو معقولة.

هذا على وجه الضبط ما تقره مبرهنة رياضية صعبة أثبتها في عام 1877 عالم الفيزياء النمساوي لودفيج بولزمان [Ludwig Boltzmann]، الذي عرف بمزاجه المهتاج وسرعة غضبه. لقد وجد طريقة في تعريف الأنتروبيا بوصفها مقياسًا إحصائيًا لحركة مجموعة من الذرات، وبيّن أن حالات التصادم بين الذرات تدفع بالأنتروبيا إلى قيمتها الأعظم. بولزمان هو مصدر فكرة أن الأنتروبيا تتعلق بالنظام والفوضى. لو أن الذرات السريعة في وعاء به غاز تكدست جميعها في جانب، فيما بقيت الذرات البطيئة في الجانب الآخر، لكان هذا وضعًا على درجة غير عادية من الترتيب أو النظام. سوف يحوز أنتروبيا منخفضة. أما إذا اختلطت كل الذرات، تصادمت واشتركت في طاقتها بالتساوي الممكن، فسوف تحصل على القدر الأعظم من الأنتروبيا. آنذاك تكون الذرات غاية في الفوضى؛ أي مرتبة بأقصى قدر ممكن من العشوائية. سوف يعم بشكل منتظم الجهل بالمقاصد التي تروم الذرات تحقيقها.

غير أن هناك شيئًا في مبرهنة بولزمان لم يبد صحيحًا. يمثل تزايد الأنتروبيا اتجاهية ـ فهي عملية تحدث دومًا في اتجاه واحد، ولا تحدث إطلاقًا في الاتجاه الآخر. على ذلك فإن قوانين نيوتن، التي تحكم حركة الذرات، متساوية كلية فيما يتعلق بالزمن. لو أن فئة من الحركات الذرية تمت عكس اتجاه الزمن، لظلت تمتثل لقوانين نيوتن. لا تشمل الميكانيكا أي تمييز حقيقي بين الماضي والمستقبل، في حين أن هذا التمييز يظهر بشكل غامض في مبرهنة بولزمان، المستنبطة بشكل مفصل من الميكانيكا.

لم تمر سنون قليلة على إثبات بولزمان مبرهنته حتى أثبت عالم الرياضيات الفرنسي هنري بونكاريه [Henri Poincare] مبرهنة بدا أنها تناقض مبرهنة بولزمان. حين تطبق على فئة من الذرات تؤلف حجمًا من الغاز، تقر مبرهنة بونكاريه أنه يتعين على كل ترتيب ممكن للذرات، يناظر أوضاعًا ذات أنتروبيا عالية أو منخفضة أو متوسطة،

أن يحدث عاجلاً أو آجلاً، طالما انتظرنا أمدًا كافيًا. في هذه الحالة، يبدو أنه بمقدور الأنتروبيا بل يتوجب عليها أن تنقص بقدر ما تزيد.

لقد حدت مثل هذه الإرباكات ببعض علماء الفيزياء إلى تبني وجهة نظر متطرفة: لقد قالوا إنه يستحيل على الذرات أن تكون حقيقية، فهي تفضي إلى مفارقة نظرية. في بعض الأوساط، هناك من تحمس لقبول هذه النتيجة. في العالم الذي يتحدث الألمانية بوجه خاص، ظهر ما يسمى بفلسفة العلم الوضعية، التي جادل أشياعها عن عوز الذرات للشرعية أصلاً. عندهم، يتعين على العلم أن يتعامل مع ما هو قابل لأن يرى ويلمس، مع ما يتسنى للقائمين على التجارب ملاحظته وقياسه. هذا يعني أن الذرات في أفضل الأحوال تخمينية، والاستدلال المؤسس عليها افتراضي صرف. لقد أكد الوضعيون بشدة أن الذرات ليست المكونات الواقعية الجديرة بالثقة التي يفترض أن يتشكل منها العلم الحقيقي.

لم تسهم المحاولات الملتوية التي بذلت لحل التناقض الظاهر بين مبرهنتي بولزمان وبونكاريه إلا في إسعاد الوضعيين. مفاد هذا [التناقض] أن مبرهنة بولزمان - بسبب افتراضات بعينها اضطر إليها لتفكيك الرياضيات المروعة التي أقحم نفسه فيها - ليست صحيحة تمامًا. بوجه عام، اضطراب الذرات المنظمة أرجح من انتظام الذرات المضطربة - غير أن هذا الأمر الأخير ليس مستبعدًا كلية.

وفق هذا الاستدراك، لاحظ علماء الفيزياء أن نظريتهم الحركية في الحرارة تخبرهم بشيء غير متوقع ودقيق. لقد رأوا أنه ليس من المؤكد بشكل مطلق أنه يتعين دائمًا على الأنتروبيا أن تزيد وأن تنتقل الحرارة من الساخن إلى البارد. ثمة فرصة، تتوقف على الطريقة التي تصادف تصادم الذرات بها، في أن ينتقل قليل من الحرارة من موضع بارد إلى موضع أكثر سخونة، بحيث تنقص الأنتروبيا بضع لحظات. الاحتمال هنا يدخل إلى الصورة على نحو يتعذر تجنبه. في معظم الأحوال، سوف يحدث كل شيء على النحو المتوقع. دائمًا تقريبًا سوف ينحو التصادم بين الذرات إلى إحداث زيادة

في الفوضى، ولذا فإن الأنتروبيا سوف تزيد. غير أن العكس ليس مستحيلاً؛ إنه فحسب غير محتمل.

أسهمت هذه النتيجة المراوغة والمشكوك في أمرها في تأجيج شدة سخط الوضعيين. وفق رؤيتهم، إذا كان قانون الفيزياء يعني أي شيء، فلا ريب أنه يتعين أن يكون محددًا. أن تقول إن الحرارة تنتقل في أرجح الأحوال من الساخن إلى البارد، ولكن هناك احتمال، مهما كانت ضئيلاً، في حدوث العكس، هو أن تسخر من التفكير العلمي. غير أن هذا مبرر آخر لرفض ما يسمى بالذرات.

هكذا أصبح ملحًا لدى أنصار الذرات من علماء الفيزياء دعم قضيتهم بطريقة يقبلها الوضعيون. في عام 1896، عثر بولزمان نفسه، في معرض رده على نقاده، على حجة مباشرة وبسيطة في صالح الذرات. لقد كتب يقول "إن الحركات الملاحظة في جسيمات الغاز الغاية في الصغر قد ترجع إلى أن الضغط الذي يمارسه الغاز على سطوحها يكون أحيانًا أكثر قليلاً، ويكون أحيانًا أقل قليلاً". بتعبير آخر، لأن الغاز مكون من ذرات، ولأن الذرات تتحرك بطريقة غريبة الأطوار، فإن هناك جسيمًا صغيرًا في الغاز يتحرك جيئة وذهابًا بطريقة غير متوقعة. هذا على وجه الضبط ما سبق أن أقره جوي، متأسيًا بالأبوين ثريون وديلسو. غير أنه يستبان أن بولزمان لم يطلع على أعمالهم. لقد كان أول عالم فيزياء ذو قدرة رياضية فائقة يعثر على فكرة أن الحركة البراونية تشكل شاهدًا بصريًا مباشرًا ليس فقط على الطبيعة الذرية للمادة؛ بل على العشوائية الكامنة في الحركات الذرية.

بيد أن ملاحظة بولزمان المجانية هذه لم تثر انتباه أحد. الراهن أنها لم تكد تلاحظ حتى من قبل مؤرخي العلم. إن طريقته العادية في الخوض في أمرها إنما تنبئ بأنه لم يعتبر اقتراحه جديدًا أو ذا أهمية خاصة. مثل ثريون، وديلسو، وجوي، لم يعتبر حقيقة أن الحركة الجزيئية تفسر الحركة البراونية أمرًا لافتًا. وخلافًا لمن سبقه من المفكرين، الذين أشاروا بطريقة مبهمة إلى "قانون الأعداد الكبيرة"، "، ولأنه كانت لدى بولزمان

سطوة على النظرية الإحصائية، كان في وسعه حساب قدر الحركة البراونية المتوقعة وفق الحركات التحتية التي تقوم بها الذرات.

غير أنه لم يقم بهذا الجهد. أيضًا، لم ينتبه ماكسويل إلى المعلومات التي تؤمّنها الحركة البروانية لعلماء الفيزياء. لقد فهم بولزمان الآن فحوى الرسالة، غير أنه لم يواصل الاهتمام بها، ربما لأنه اعتبر الأمر واضحًا بما يكفي.

مر عقد آخر قبل أن تبلغ قصة الحركة البراونية نتيجتها الخطيرة، وفي هذا الموضع من قصتنا نواجه أول مرة فكر آلبرت أينشتين الثاقب. في عام 1905، كان أينشتين البالغ من العمر ستة وعشرين عامًا شابًا فطنًا ومرتبًا، وكان يعمل في مكتب للاختراعات المسجلة في برن، لأنه لم يكن قادرًا على الحصول على وظيفة أكاديمية. ورغم أنه نشر بضعة أبحاث، لم يحظ بشهرة في الأوساط الفيزيائية. غير أن الوقت كان أزف لتغير كل ذلك.

ولكونه معجبًا بدراسات بولزمان التخصصية المكثفة والمسرفة في التفاصيل، افتتن أينشتين بالأسئلة الإحصائية في الفيزياء وبالخلاف المصاحب حول وجود الذرات. في مرحلة ما، لاحظ هو الآخر أن الجسيم الصغير الذي يغمر في سائل يقفز بسبب حدوث صدامات جزيئية ـ تمامًا كما قال بولزمان. غير أنه يظهر أن أينشتين، مثل الآخرين، لم ينتبه إلى هذه الملاحظة الغامضة التي قال بها سلفه. وعلى أي حال، شرع أينشتين يحفر في الأعماق. لقد تساءل عما إذا كانت حركة جسيم كبير جدًا يمكن من رؤيته عبر المجهر قد تشكل اختبارًا مباشرًا وكميًا للفرض الذري. هذا على وجه الضبط ما طالب به الوضعيون، لكنهم قالوا باستحالته. ووفق هذا قرر حساب الإجابة.

لم يكن استدلالاً مباشرًا. لقد سبق لجوي أن لاحظ أنه يتعين في المتوسط أن تكون للجسيم البراوني طاقة الحركة نفسها التي تحوزها الجزيئات في السائل الذي غمرت

فيه. سوف تتحرك هذه الجزيئات بسرعة كبيرة، كونها أقل كتلة عدة مرات، في حين يتحرك الجسيم البراوني على نحو أشد بطئًا. يتعين أن تكون هناك علاقة بسيطة بين متوسط سرعة الجزيء ومتوسط سرعة الجسيم في السائل. غير أن طبيعة الحركة البراونية غريبة الأطوار صعّبت من تحديد متوسط سرعة الجسيم بشكل مناسب، و لم يكن في وسع مجرب في نهاية القرن التاسع عشر أن يقوم بقياس أو رصد حركة مثل هذا الجسيم بدقة.

بشكل بارع، اتخذ أينشتين سبيلاً آخر. لقد عثر على طريقة ليس في حساب حركة جسيم مغمور في سائل بل في حساب كيف تسبب حركته هنا وهناك انجرافًا خلال فترة بعينها من الزمن. مثال ذلك، بالمقدور رسم دائرة صغيرة حول نقطة بدء حركة جسيم ما والتساؤل عن متوسط زمن وصوله إلى المحيط. هكذا استنبط أينشتين نتيجة نظرية يمكن تعريضها للتدقيق العملي. وأخيرًا، بعد مرور ما يقرب من ثمانين سنة على طرح روبرت براون تصورًا علميًا لحركة جسيمات صغيرة مغمورة في سائل، أثبت أينشتين أول معالجة كمية لسببها. لقد شكل تحليله البارع أحد أربعة أبحاث تاريخية نشرها في تحفه السنوية عام 1905؛ في الأبحاث الأخرى طرح نظريته النسبية الخاصة على ما كان آنذاك جمعا من علماء الفيزياء مصاب بالذهول، وأمّن مفاهيم مستفزة في طبيعة الضوء الحقيقية.

وفي حدث ساخر أخير يبعث على الاستياء، اتضح أن أينشتين، حين شرع في حساباته، لم يكن يعرف حتى بوجود شيء اسمه الحركة البراونية. الحال أنه لم يكتشف أن الظاهرة كانت معروفة لدى المجهريين، وعلماء النبات، وآخرين منذ آجيال عدة، إلا أثناء كتابة بحثه. في مقدمة هذا البحث، حذر من أنه "من الممكن أن تكون الحركات التي تتعين مناقشتها هنا هي ما يسمى "بالحركة الجسيمية البراونية"؛ على ذلك، فإن التفاصيل التي تسنى لي التحقق منها فيما يتعلق بالأخيرة أقل دقة من أن تسمح لي بإصدار أي حكم في هذا الخصوص".

بعد ثلاث سنوات، في عام 1908، أجرى عالم الفيزياء الفرنسي جان بيران [Jean Perrin] سلسلة من التجارب الدقيقة لقياس الحركة البراونية، وقارن النتائج مع ما خلصت إليه نظرية أينشتين. كان هناك تطابق تام، وغالبًا ما يستشهد بعمل بيران بوصفه القرينة الحاسمة والقاطعة على وجود الذرات. لم يشكل هذا مفاجأة عند معظم علماء الفيزياء، بل كان تأييدًا سارًا لما اعتقدوا فيه فترة طويلة. حتى أشد الوضعيين معارضة للذرية، باستثناء واحد أو اثنين منهم، اضطر إلى التسليم.

من هذا المنظور، كانت الذرات حقيقية على نحو يتعذر إنكاره. في الوقت نفسه، كان التفكير الإحصائي متشبثًا بموضعه الراسخ بوصفه جزءًا جوهريًا من التنظير الفيزيائي. لقد قامت بين الاثنين علاقة لا تنفصم عراها. وبطبيعة الحال، سعد الذين ناصروا النظرية الحركية لسنوات بهذا التطور: أي تصور مفيد في الذرات يتضمن بالضرورة استدلالاً إحصائيًا. الطبيعة الاحتمالية التي تسم قانون الديناميكا الحرارية الثاني ـ تزيد الأنتروبيا دائمًا تقريبًا ـ إنما وجدت لتبقى.

على ذلك، ظلت الحتمية باقية هي الأخرى ـ أو هكذا بدا. لا ريب أن فتنة الاستدلال الإحصائي عند أينشتين قد تعينت في كونه يسمح لعلماء الفيزياء بإصدار أحكام كمية عن سلوك حشود الذرات، حتى إن استعصى على الملاحظ فهم حركة الذرات الفردية. الأمر المهم الوحيد هو أن هذه الحركات تمتثل إلى قواعد محكمة وصحيحة. تظل الطبيعة، في النهاية، حتمية بشكل جوهري. المشكلة هي أن الملاحظين العلميين عاجزون عن جمع كل المعلومات التي يحتاجون لتحقيق مثال لابلاس، المعرفة الكلية التي تفضي إلى قدرة كاملة على التنبؤ.

نقح علماء الفيزياء بشكل بارع تقديراتهم لما تعنيه النظرية، ولكن دون تثمين كامل لقيمة ما حدث. حتى ذلك الوقت، ظلت النظرية مجموعة قواعد تفسر فئة من الحقائق. ثمة تطابق دقيق ثنائي الاتجاه بين النظرية والتجربة. غير أن الأمر لم يكن على

هذه الشاكلة. لقد أصبحت النظرية تشمل عناصر يثق علماء الفيزياء في وجودها، دون أن يتسنى لهم الوصول إليها تجريبيًا. عند المنظِّر، للذرات وجود محدد، ومواضع وسرعات بعينها. عند المجرب، لا توجد الذرات إلا بشكل استدلالي، ولا سبيل لوصفها إلا إحصائيًا. هكذا فتحت فجوة بين ما تقر النظرية أنه الصورة الكاملة والصحيحة للعالم المادي وما يتسنى للتجربة الإبانة عنه عمليًا في هذا العالم.

ما فقد إذن ليس المثال المؤسس الخاص بعالم مادي حتمي بل الرجاء اللابلاسي في كمال التصور العلمي لذلك العالم. يتكشف الكون بهدوء وفق تصميمه الداخلي. للعلماء أن يأملوا في فهم التصميم بشكل كامل. غير أنه يبدو أنه لم يعد في وسعهم الحصول على معرفة كاملة بالكيفية التي يتحقق بها هذا التصميم. بمقدورهم معرفة المخطط الأولي لهذا الكون، ولكن ليس في وسعهم معرفة شكل وحجم كل لبنة.

من ضمن الشراح الذين لمحوا إلى هذه الصعوبة، المؤرخ هنري آدمز [Henry Adams]، الذي تصور سيرته الذاتية غريبة الأطوار، The Education of Henry Adams [تعليم هنري آدمز]، رجلاً من الطراز القديم، باحثًا في العلوم السياسية والثقافة والدين، يناضل في سبيل البقاء في عالم تتزايد سطوة العلم والتقنية عليه. لم يكن مردّ ذلك معارضته للعلم؛ بل كونه وجد مهابته ونطاقه أشياء منفرة ومصادر تهديد بمخاطر لا يستهان به.

كان آدمز قد سمع عن تقدم الاستدلال الإحصائي في الفيزياء ووجد أنه مربك بطريقة لم يفكر فيها معظم العلماء. يهدف العلم بطبيعة الحال إلى التمام والكمال، ولكن ما حدث الآن، وفق لغة آدمز الرفيعة، هو "أن التركيب العلمي الذي يستدعي "الوحدة" هو نفسه التحليل العلمي الذي يتطلب "التعددية"". لقد بدا له، بطريقته الحماسية المبالغ فيها إلى حد، أن النظرية الحركية على بُعد خطوة واحدة، فلسفيًا، من

الفوضى والشواش. أي معنى لطلب الوحدة والتركيب في العلم إذا كان مبلغ ما تمكّن منه قوة التنبؤ بدءًا من الآن هو التقريب؟

طرح آدمز هذه الأحجية على أصدقائه ذوي الميول العلمية والفلسفية، غير أنه أسى على حقيقة أن "الجميع هنا يرفض صراحة طلب العون". لعلهم لم يستطيعوا فهم ما أراده. لقد كان العلماء يعتبرونه مجرد شخص متيم بالخطابة الملغزة والمبهمة. لم يبد لهم سوى أن نظرياتهم الإحصائية منحتهم فعلاً فهمًا أعظم للكون وقدرة أكبر على التنبؤ. لقد فهموا الآن أكثر مما فهموا من قبل، وسوف يفهمون المزيد في المستقبل. أي فقد سوف يكون مفهوميًا، ميتافيزيقيا، فلسفيا ـ ومن ثم لا أهمية علمية لديه.

الفصل الثالث

غموض، موضع حيرة عظيمة

سوف نكون أشد تحريًا للدقة إذا قلنا إنه بحلول العقد الأول من القرن العشرين، أصبح العلم يحشد بوفرة من الذرات، تقوم كل منها بمهام متمايزة لا علاقة واضحة بينها. وقد كان من ضمن أكثرها أهمية ذرات علماء الكيمياء، وهي وحدات مادية غير قابلة للقسمة تسهم في تفاعلات بعينها وتتجمع بحيث تشكل جزيئات. ذرات علماء الفيزياء الحركية لم تكن محل توقير مماثل، فهي كرات البليارد الأولية التي حددت بصداماتها العشوائية مادة قوانين الحرارة. من منظور نظري، لم يكن هناك أساسًا أي موضع للاتصال بين هذين النوعين من الذرات. وفي عام 1896، أضيفت مهمة جديدة إلى الذرة المثقلة أصلاً بالأعباء.

أمّن اكتشاف هنري بيكويريل [Henri Becquerel] للنشاط الإشعاعي شهادة بليغة على القدرة السرنديبية [موهبة اكتشاف الأشياء النفيسة مصادفة]. في أول أيام يناير من عام 1896، بعث عالم فيزياء ألماني اسمه فيلهلم رونتجن [Wilhelm Rontgen] إلى زملائه في أرجاء أوربا تفاصيل ملاحظة مدهشة. ولكي يثبت ما أراد، أرفق صورة ليده - أو شبيهًا مخيفًا لعظامها؛ حيث يمكن تمييز اللحم كهالة شاحبة، فيما يظهر ظل واضح لخاتم زواجه يدور حرًا حول هيكل إصبعه الأوسط. كانت هذه أول صورة للأشعة السينية يعرفها العالم، وقد أثارت المشاعر ليس فقط في الأوساط العلمية بل حتى في الأوساط الصحفية، التي تسابقت على طباعة صور عظام، ومسامير دخلت في الأطراف بسبب حوادث تعرضت لها، وتشوهات هيكلية داخلية من نوع أو آخر.

كان اكتشاف رونتجن نفسه محض مصادفة. لقد لاحظ وهجًا غريبًا على شاشة فسفورية في معمله كانت على مقربة من أنبوب لتفريغ الشحن الكهربية، وحين تقصى الأمر، رأى ظلاً عظميًا يظهر للعيان حين وضع يده بين الأنبوب والشاشة. لقد استبين أن علماء الفيزياء كانوا يستخدمون الأشعة السينية لسنوات دون أن يعرفوا. وما أن شاع النبأ حتى بدأت المختبرات عبر العالم في تقصي هذه الأشعة غير المرئية النافذة، وسرعان ما اتضح أنها نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي ذا موجة أقصر من الضوء المرئي وفوق البنفسجي.

بعد أن رأى بيكويريل صور الأشعة السينية في اجتماع عقدته في باريس "أكاديمية العلوم الفرنسية" [French Academy of Sciences] في بداية عام 1896، شرع في المضي وراء حدس خطر له. لقد كان ابن وحفيد عالمي فيزياء باريسيين مبرزين، تخرج كلاهما من "كلية التقنيات المتعددة" [Ecole Polytechnique]، كما أن كليهما عضو في "الأكاديمية الفرنسية" [Academie Francaise]، وقد تولى أحدهما بعد الآخر منصب كرسي الفيزياء في "متحف التاريخ الطبيعي" [Musee d'Histoire Naturelle]. وحين يأزف الوقت، سوف يقتفي ابن هنري خطا سلفيه. لقد قام مختلف أبناء أسرة بيكويريل بالبحث في الكهرباء، والكيمياء، وضوء الشمس، فضلاً عن أشياء أخر، غير أن هناك شاغلاً بعينه كان يشكل تقليدًا عائليًا. لقد قاموا جميعهم بدراسة الاستشعاع [التفلور]؛ حيث يتضح أن بعض المعادن التي تتعرض لضوء الشمس الشديد، تبعث من تلقاء نفسها ضوءًا خافتًا حين توضع في مكان مظلم. كرّس والد هنري نفسه لدراسة استشعاع المعادن التي تحمل يورانيوم، حتى أصبح خبيرًا فيها.

حين سمع عن الأشعة السينية، تساءل هنري بيكويريل ما إذا كان لهذا الإصدار المثير الجديد أي ارتباط بالاستشعاع الذي يعرف عنه الكثير. لقد بدا أن أولى تجاربه تؤكد وجود ارتباط. أخذ مجموعة منوعة من المعادن الفلورسنتية، بما فيها كبريتات يورانيول البوتاسيوم (الذي يفضله أبوه)، ووضعها في شرائح فوتوغرافية ملفوفة بإحكام في ورقة سوداء سميكة، ثم عرض هذه العينات لضوء الشمس الساطع

كي ينشط عملية الاستشعاع. وبعد ساعات قليلة قام بتحميض الشرائح، فوجد أن الشريحة الموجودة تحت المعدن الذي يحتوي على يورانيوم قد تضببت بسبب إصدارات نفذت عبر الورقة المعتمة. وهكذا استنتج أن هذا المعدن، المنشط من قبل أشعة الشمس، هو مصدر الأشعة السينية.

غير أن الحظ شاء أن تتلبد باريس بالغيوم. لأيام لم يكن هناك من سبيل لاستقبال أشعة الشمس، فما كان من بيكويريل إلا أن أودع تجاربه في الدرج. في إحدى المرات، ربما ليختبر سلامة شرائحه الفوتوغرافية الملفوفة، أخرج واحدة منها من مكانها الخفي المعتم وقام بتحميضها. غير أنه فوجئ بأن هذه الشريحة تضببت هي الأخرى. رغم أنه لم يتعرض لأشعة الشمس، صدر عن معدن اليورانيوم نوع من الإشعاع نفذ عبر الورقة السميكة وأثار رد فعل في المواد الكيماوية الحساسة. لم يكن الإشعاع سينيًا ولا من النوع المتفلور المألوف؛ بل شيئًا جديدًا وغريبًا، كامنًا في المعدن نفسه. لقد سماه بيكويريل Les rayons uraniques، وهو تعبير لخص كل ما عرف. [الأشعة اليورانية المتفردة؛ حيث يبدو أن هذا التعبير يستثمر الجناس مع كلمة unique التي تفيد التفرد].

حين أبلغ بيكويريل "أكاديمية العلوم" باكتشافه الغريب، فوجئ باستجابة فاترة. ظلت الأشعة السينية تفتتن الناس، ولم يكن في وسع البقع الغائمة أن تنافس صور العظام المكسورة. لم يكترث بيكويريل، وقفل راجعًا إلى معمله. بصياغة فرض خاطئ حول الأشعة السينية السرنديبية التي اكتشفها رونتجن، لم يجر بيكويريل تجربة مضللة إلا ليرغمه الطقس الرديء على القيام بتجربة أكثر أهمية. وعلى هذا النحو صادف ظاهرة علمية جديدة كلية. غير أنه ليس في وسع السرنديبية أن تذهب إلى أبعد من ذلك، وفي هذه المرحلة، نفد إلهام بيكويريل. لم يكن يعرف أي شيء آخر بمقدوره أن يقوم به، ولم يبد أن هناك أي شخص آخر يشغله هذا الأمر.

لم تجذب Les rayons uraniques الانتباه حتى نهاية السنة التالية، تحديدًا إلى أن عنيت بها باحثة شابة كانت تبحث عن مجال بكر تحدث فيه فرقًا. لقد كانت

هذه المبتدئة هي ماري كوري [Marie Curiee]، التي كانت تعرف باسم ماريا سكلودفسكا [Maria Sklodowska]. كان أبواها يعملان مدرّسين في وارسو. ولأن بولندا كانت آنذاك ترزح تحت نير الحكم الروسي، خططت ماريا وأختها الأكبر سنًا منها برونيا [Bronia] للبحث عن حريتهما في مكان آخر. سافرت برونيا إلى باريس لدراسة الطب، في حين رحلت ماريا، التي سماها الفرنسيون ماري، لدراسة الفيزياء والرياضيات. حتى في باريس، التي كانت أكثر ترحيبًا بالطالبات من معظم المدن الأوربية، اعتبر خيارها هذا جريئًا. كانت الحكمة السائدة تقر إن الذهن الأنثوي، إذا كان قابلاً أصلاً للتعليم، أنسب للعلوم الطبية والحيوية الأكثر نعومة. غير أن ماري، العنيدة والمستقلة، شقت طريقها الذي اختارت. قابلت وتزوجت بيير كوري [Pierre Curie]، وهو عالم فيزياء يكبرها بثمان سنوات كان مستعدًا لأن يكون مشاكسًا مثلها. صمم الاثنان على مباشرة مسار بحثي يخصهما.

دون أن يعرقلها اعتقاد بيكويريل في أن اليورانيوم هو المكون الأساسي، قامت ماري كوري بمسح منتظم لكل أنواع المعادن، الشائعة والنادرة على حد سواء، لتعرف ما إذا كانت تصدر أشعة نافذة. لم تصدر عن الذهب والنحاس أية أشعة. اكتشفت أن كل معادن اليورانيوم نشطة، كما خلص بيكويريل، ولكن هذا أيضًا شأن معدن الأسكينايت، الذي لا يحتوي على يورانيوم. أما البتشبلند [معدن أسود لامع]، معدن اليورانيوم الخام الأساسي، فقد كان نشطًا فعلاً، غير أنه كان نشطًا أكثر مما يجب - ما جعله يصدر إشعاعات بكثافة فاقت حسابات ماري، وفق تقديرها لمحتواه اليورانيومي. باختصار، فيما خلصت ماري بسرعة، ثمة أشياء غير اليورانيوم تصدر Les rayons uraniques.

باشر آل كوري سويًا في حل الصعوبة المضنية وفي القيام بالمهمة المثقلة بالتفاصيل والمتعينة في استخلاص مصادر الإشعاع الإضافية من البتشبلند. أنتجت عملية الفصل الكيميائي، التي أدت إلى استخلاص عنصر البزموت المعروف، بعضًا من البقايا النشطة. ولأنهما عرفا أن البزموت نفسه لم يكن نشطًا، استنتجا أن هناك عنصرًا جديدًا، مشابهًا كيميائيًا للبزموت، ومصاحبًا له، يشكل مصدر النشاط.

أعلن آل كوري عن هذه النتيجة في أبريل 1898، واقترحا تسمية هذا العنصر الجديد بالبولونيوم، تكريمًا لمسقط رأس ماري. في السنة نفسها، وجدا دليلاً على عنصر ثان نتج عن عملية استخلاص كيميائية للباريوم، أسمياه راديوم، وذلك في تقرير حمل أيضًا اسمًا جديدًا للظاهرة التي كان اكتشفها بيكويريل أصلاً: النشاط الإشعاعي.

ما حدث تاليًا كان من ضمن أكثر الجهود الصعبة، قاسمة الظهر، والخطرة في تاريخ العلم. من منجم للبتشبلند في جواكمستال، في تشكيوسلوفاكيا (التي استخدمت معادنها في صك العملات الألمانية، والذي تحول اسم أحدها، Thaler، في النهاية إلى كلمة دولار)، حصل آل كوري على عشرة أطنان من البقايا الناتجة عن استخلاص اليورانيوم. كانا يستخدمان سقيفة كبيرة متداعية، يعلوها سطح زجاجي به ثقوب، وكان عليهما ترك نوافذها مشرعة حتى أثناء الطقس الرديء كي يسمحا للدخان الضار بالصحة بالخروج. وفي مشاهد تليق بمسرحية "ماكبث"، كانت ماري كوري تحرك وتغلي مراجل من بقايا المعادن الخام والمواد المذيبة، وتختزل عشرات الكيلوجرامات من رغوة المعادن إلى جرامات من نواتج التقطير النفيسة، ثم تجمع هذه القطارة الناتجة وتختزلها ثانية كي تضاعف من تركيز الراديوم. خلال العامين التاليين، أبلغت "أكاديمية العلوم" عن تقدمها المستمر في طلبها فصل العنصر الجديد. وبتعاظم تركيز الراديوم، بدت عيناتها الصغيرة تتوهج بإشعاعاتها. لقد كانت، صحبة زوجها، تحمل هذه المصادر الإشعاعية النشطة والضارة أمام عينيها المغمضتين كي ترى ومضات وشهبًا من الضوء في مقلتيها.

وفي يوليو من عام 1902، بعد قرابة أربع سنوات من العمل العلمي الشاق، أعلنت ماري كوري أن أنها من عشرة أطنان من البقايا تمكنت من استخلاص ما مجمله عشر جرام من الراديوم النقي. لم يكن مر على ولادة جدول العناصر الدوري، هذا النسق المنظم العظيم الذي حلم به ديمتري منديليف [Dmitri Mendeleyve]، سوى ثلاثين عام ونيف. لقد كان اكتشاف إضافة جديدة إلى الجدول غاية في الإثارة. الراهن أن الراديوم كان إضافة غريبة حقًا، عنصرًا جديدًا ذا قدرات غامضة تعد بأن تكون مثيرة.

بدأ الراديوم في لفت الانتباه بفضل جهود ماري كوري الجبارة. وفق دور الملاحظ المرتبك الذي كان يعيه تمامًا، أعجب هنري آدمز بالعلم والأجهزة التي كانت تعرض في Great Exposition [المعرض العظيم] في باريس عام 1900. تجول في المعرض صحبة عالم الفضاء الأمريكي صموئيل لانجلي [Samuel Langley]، الذي قام بقياس مجمل الطاقة الشمسية، بما فيها أشعتها تحت الحمراء غير المرئية، فضلاً عن ضوئها المرئي. وبأسلوبه البليغ، روى آدمز ما حدث بقوله: "لقد كانت جميع أشعة [لانجلي]، التي ضاعف بها الطيف الشمسي، غير ضارة بل مفيدة. غير أن الراديوم أنكر إلهه ـ ما يعني عند لانجلي، أنه أنكر حقائق علمه. لقد كانت القوة جديدة كلية". صحيح أنه كان للعلماء أن يحتجوا ضد اقتراح أن النشاط الإشعاعي إله جديد ـ غير أنه لا ريب أنه كان ظاهرة تجاوزت نطاق علم الفيزياء آنذاك.

حصل آل كوري بسبب اكتشافاتهما على جائزة نوبل في الكيمياء عام 1903، مناصفة مع هنري بيكويريل. لقد كانا منظمي ومصنفي الظاهرة الجديدة. ولكن ما طبيعة هذه الإصدارات النشطة، وما العملية التي أطلقتها؟ لم تكن موهبة ماري كوري كافية لتناول هذه الأسئلة. غير أن بعض الملاحظات الرؤوية التي أبدتها كشفت عن كيف أنه كان بمقدورها معرفة طبيعة الأحجية القادمة. لقد أفضى فحصها المدقق للنشاط الإشعاعي من مصادر عديدة إلى نتيجة لا مناص منها: تتوقف شدة الإشعاعات النشطة على كمية العنصر المشع في المصدر، ولا تتوقف على أي شيء آخر. إنها لا ترتهن بالشكل الكيميائي الذي يتخذه العنصر، ولا بدرجة حرارة العينة، ولا بالضوء أو الظلام، ولا بأي مجال كهربي أو مغناطيسي. هكذا كتبت في ديسمبر من عام 1898 تقول إن "النشاط الإشعاعي خاصية ذرية" ـ ما يعني أن كثافته تتوقف بشكل بسيط وكلي على عدد ذرات اليورانيوم أو البولونيوم أو الراديوم الذي تحتويه العينة.

بعد عامين، وفي مراجعة شاملة أعدها آل كوري لاجتماع دولي حول الفيزياء عقد صحبة "المعرض العظيم"، طرحا إقرار أكثر ثراء: لقد قالا إن "تلقائية الإشعاع مسألة غامضة، موضع حيرة عظيمة".

التلقائية: لقد كان هذا عاملاً غريبًا وحاسمًا، وكان معيبًا بوجه خاص عند العلماء الذين شبوا على مواريث القرن التاسع عشر. إذا كانت كتلة من خام اليورانيوم، حجرية وخاملة، تقبع على مقعد مختبري وتبعث أشعة غير مرئية، فأين عملية السبب والنتيجة؟ أين الفكرة الأساسية علميًا التي تقول إنه إذا حدث شيء فإنه يحدث لسبب، نتيجة حدث أسبق جعله يحدث؟ النشاط الإشعاعي، وفق ما يمكن لأي أحد أن يقر عام 1900، غير مسبب، ومن ثم لا مدعاة له من وجهة نظر علمية.

أكثر من ذلك، فإن النشاط الإشعاعي يصدر طاقة. في عام 1903، جمع بيير كوري وأحد مساعديه عينة كبيرة بما يكفي من الراديوم لإثبات أنه بمقدور نشاطها أن يسخن عينة صغيرة من الماء حتى تصل إلى درجة الغليان. لقد جعلت تجربة أجريت في اللقاء السنوي الذي عقدته "الجمعية البريطانية لتقدم العلم" [British Association for the Advancement of Science] أحد الملاحظين يتساءل ما إذا كان هذا نوعًا من الحركة السرمدية. فهل انبثقت الطاقة الإشعاعية، بطريقتها التلقائية، عن لا شيء؟

كانت ماري كوري تميل نحو فكرة أن قانون بقاء الطاقة، الذي مر عليه آنذاك خمسون عامًا، لم يكن بالأمر المطلق الذي افترضه العلماء. لعله يمكن للذرة أن تستحدث طاقة من لا شيء وأن تواصل نشاطها كما كانت. لم يكن قبول هذا سهلاً، غير أنه بدا لآل كوري ولكثيرين آخرين التأويل الأقل عوزًا للوجاهة ضمن التأويلات المتنوعة والمستهجنة لتلقائية النشاط الإشعاعي المقلقة.

الرجل الذي أسهم أساسًا في تبديد هذا الحيرة ـ وأثناء ذلك أوجد الذرة الحديثة ـ جاء هادرًا إلى المشهد من طفولة أمضاها في مزرعة في نيوزيلندا. كان أرنست رذرفورد [Ernest Rutherford] ذكيًا، ومبدعًا، ومتحمسًا. جاء رذرفورد إلى كيمبردج عام 1897، مدعمًا بمنحة دراسية خاصة بسكان المستعمرات الموهوبين، للدراسة على يد جي.جي. تومسن [J.J. Thomson] ـ الذي اشتهر عالميًا باسم جي.جي. ـ والذي كان آنذاك رئيس "المختبر الكافندي" [Cavendish Laboratory]. وصل رذرفورد في لحظة مثيرة أتاحت له فرصة نادرة. فقبل أشهر قليلة، أثبت تومسن بشكل لا

ينسى أن إشعاعات أنبوبة التفريغ المعروفة بأشعة الكاثود لم تكن في الواقع سوى تيارات من الجسيمات المشحونة كهربيًا [إلكترونيًا] (electrically). هكذا دخلت كلمة إلكترون (electron) اللغة، وثبت أن الإلكترون شيء دقيق، أقل كتلة بكثير من أية ذرة مفردة. في الوقت نفسه، وبفضل آل كوري، نجحت الأنشطة الإشعاعية أخيرًا في لفت الانتباه. بهذه الاكتشافات الأساسية التي كانت تجرى من حوله، أسرع رذرفورد إلى التخلي عن اهتمامه بتقنية بث الإشارات اللاسلكية ـ حيث كان اسمه يتردد لفترة صحبة اسم ماركوني [Marconi] ـ وركز اهتمامه على الفيزياء الجادة.

كان رذرفورد ومشرفه على طرفي نقيض من حيث السمات الشخصية والأصل الجغرافي. لقد كان جي.جي. مدرسة قديمة بشكل حاسم، ذا سلوك جاف، متحفظًا إلى حد، في حين كان رذرفورد زميلاً وافدًا من إحدى المستعمرات، شخصًا مرحًا صاخبًا، مولعًا بالرياضة، انغمس في حياة كيمبردج مبتهجًا بتغاضيه عن تراتيبها التفصيلية للطبقات والمنازل الاجتماعية. كان أيضًا واثقًا من نفسه، وبوجه عام لم يكن خجولاً، وإن ظل حذقًا بما يكفي ليرضي غروره. لم تكن موهبته موضع شك. في شهادة أدلى بها بخصوص المتميزين ممن تولى الإشراف عليهم، قال تومسن: "لم يسبق أن كان لدي طالب أكثر حماسًا أو أشد اقتدارًا على البحث الأصيل من السيد رذرفورد".

عمل بسرعة، فأثبت عام 1898 أنه يوجد على الأقل نوعان مختلفان من الإصدارات الإشعاعية: واحد يمكن إيقافه بقطعة من الورق المقوى، وآخر يحوز قدرة أكبر على النفاذ، وقد أسماهما نمطي النشاط الإشعاعي ألفا وبيتا. ظلت هوية جسيمات ألفا غير واضحة، بيد أن جسيمات بيتا، فيما اتضح بعد قليل، لم تكن سوى إلكترونات سريعة الحركة.

هل يعني هذا إذن أن الذرات تحتوي على إلكترونات؟ ربما ـ غير أن هذا لا يشكل بالكاد القصة بأكملها. ففي حين أن الإلكترونات خفيفة ومشحونة كهربيًا، فإن الذرات ثقيلة وغير مشحونة. طور تومسن ما أصبح يعرف بذرة "حلواء البرقوق"،

حيث يتحرك عدد صغير من الإلكترونات بطريقة ضمن كتلة صغيرة شبه كروية من نوع من الوسط المشحون إيجابيًا، أثير، ... شيء ما، على أي حال، بمقدوره أن يوفر كتلة وأن يعادل شحنة الإلكترون السالبة. رغم غموضه، استخدم تومسن هذا النموذج بضع سنوات في تأويل عدد من نتائجه التجريبية، وانتهى إلى ترجيح احتواء ذرة الهيدروجين على إلكترون واحد فقط.

لم يكن رذرفورد يثق كثيرًا في التنظير. لقد بدا له أنه من السابق لأوانه التكهن بما تحتويه الذرة طالما لم يتسن لأحد معرفة ماهيتها. من كيمبردج رحل إلى جامعة مجيل، في مونتريال بكندا، حيث بقي هناك بضع سنوات، وكوّن فريقا لتقصي جسيمات ألفا وبيتا والعناصر التي تنتجها. هناك، كان رذرفورد يجول مفعمًا بالنشاط في معمله، يثني على هذا ويسأل أو يشجع ذاك، فيما يقوم أحيانًا بتعنيف أحد طلبته أو زملائه.

لم يأت الفرج بسهولة. لقد سبق لآل كوري التعرف على عدد من العناصر المشعة، فيما عثر رذرفورد وآخرون على المزيد منها. فجأة ظهر خليط مشوش من الأسماء: الراديوم: راديوم A وراديوم B، وهكذا حتى راديوم E؛ ثوريوم A، ثوريوم B، ثوريوم X، وهناك أيضًا غاز نشط إشعاعيًا أعطى اسمًا لإصدار ثوريوم؛ ثم الأكتينيوم A وB، وإصدار أكتينويوم ... كل منهما متميز عن غيره بطريقة ما، وكل منها مرتبط بغيره بطريقة ما.

باستخلاص عنصر مفترض من آخر، وبتحديد الظروف التي يختفي بسببها عنصر ويظهر آخر، بدد رذرفورد وطلابه الخلط عبر بذل جهود مضنية. وفي بحث نشر عام 1902 أعده صحبة فريدريك سودي [Frederick Sody]، وهو عالم فيزياء تعلم في أكسفورد ثم انضم إلى فريق جامعة مجيل، ظهرت النتيجة الجارفة. ما اقترحه رذرفورد وسودي كان نظرية التحول في النشاط الإشعاعي، أو بتعبير أكثر جرأة، نظرية التحول العنصري. لقد زعما بأن الأشياء التي يتم تحولها هي الذرات نفسها - ما يفترض أن يشكل لبنات العناصر غير القابلة للقسمة. وهكذا تمكنا من طرح نسق يمكن من فهم تعددية أنواع الراديوم والثوريوم والأكتينيوم وإشعاعاتها بوصفها وصلات في سلسلة

انحلال النشاط الإشعاعي؛ حيث يصير عنصر ما عنصرًا آخر، ويتحول هذا الناتج بدوره إلى ناتج آخر، فيما يصاحب كل تحول نوع بعينه من الإصدار الإشعاعي.

الخيمياء! صرخ العديد من النقاد. لقد كانت هوية العناصر المنيعة مبدأ مؤسسًا لم يثبته علماء الكيمياء إلا مؤخرًا، وبعد كفاح صعب وطويل. وهاهما رذرفورد وسودي يقولان الآن إن العناصر لم تكن في نهاية المطاف دائمة. ماري كوري، ضمن آخرين، رفضت المقترح. الذرات كينونات لا تتغير بحكم جوهرها، ولذا فإنه يستحيل على أية نظرية تقول بتحول الذرات إلى بعضها البعض أن تكون نظرية صحيحة في الذرات، أو هكذا زعمت.

غير أن قدرة نظرية التحول على تفسير تنويعة من المواد المشعة، بمساعدة عدد قليل من القواعد البسيطة، سرعان ما أقنعت العالم العلمي بصحتها الأساسية. على ذلك، أخفت إحدى هذه القواعد مفهومًا أشد هدمًا حتى من تحول العناصر. لقد لاحظ رذرفورد وسودي أن لدى كل عنصر إشعاعي معدل انحلال يتميز بما أصبح يعرف بأمد الانتصاف [فترة انتصاف العمر]. ابدأ مثلاً بجرام من عنصر كان يعرف آنذاك بالثوريوم X، وانتظر حوالى إحدى عشرة دقيقة، وسوف يبقى لديك نصف جرام. بعد إحدى عشرة دقيقة أخرى، سوف يبقى ربع جرام، ثم ثمن، وهكذا، بحيث تقترب رويدًا رويدًا من الصفر دون أن تصل إليه أبدًا.

هذا انحلال أسي، قاعدة رياضية بسيطة بما يكفي. ولكن تفكّر في العينة على أنها مجموعة من الذرات وسوف يستبان معناها المقلق. في كل إحدى عشرة دقيقة تتحلل نصف الذرات في حين يبقى النصف الآخر على حاله. ولكن من يعرف أية ذرات تنحل وأيها يبقى على حاله؟

وكما لاحظت ماري كوري، ما جعل النشاط الإشعاعي مزعجًا إلى هذا الحد هو تلقائيته. لقد تسنى لرذرفورد وسودي آنذاك جعل غير المتوقع كميًا. إن الانحلال يمتثل لقانون إحصائي أولي، بحيث إنه في كل وقت معطى، لدى كل ذرة فرصة

بعينها في الانحلال. ولكن ما الذي يعنيه هذا نسبة إلى مبدأ السبب والنتيجة، إذا كانت الذرة تبقى هناك، معنية بشؤونها، ثم تنفجر إلى شظايا في لحظة يبدو أنها غير متوقعة؟ ما الذي جعلها تنحل؟ أي ما الذي جعلها قابلة لأن تنحل أصلاً، وما الذي جعلها تنحل في تلك اللحظة بعينها؟

مرة أخرى، لم تكن العشوائية بحلول مطلع القرن العشرين مفهومًا جديدًا وخطرًا إلى الحد الذي كانت عليه في الجيل الأسبق. كان علماء الفيزياء قد ألفوا آنذاك استخدام التنظير الإحصائي في حالة الذرات الموجودة في الغازات وقبلوا على مضض اقحام الاحتمالية في سلوك الإنتروبيا غير القابل تمامًا للتنبؤ. إذا كان انحلال النشاط الإشعاعي يمتثل هو الآخر لقانون في الاحتمال، فلعل السبب المؤسس لم يكن مختلفًا كثيرًا.

هكذا برزت مقترحات من هذا القبيل. قد يكون لدى الذرة مكونات داخلية ـ الجسيمات—دون—الذرية من ضمن المقترحات التي قال بها بعض علماء الفيزياء ـ وقد تتصادم هذه المكونات بشكل مستمر على شاكلة تدافع الذرات في حجم من الغاز. ولعله يحدث أحيانًا، عبر حركتها العشوائية، أن تقترب مجموعة من هذه الجسيمات – دون – الذرية إلى بعضها البعض بحيث تسبب بطريقة ما اضطرابًا في الذرة بأسرها. هذا لا يشكل بالكاد أية نظرية، غير أنه جعل الانحلال الاحتمالي مقبولاً للسبب نفسه الذي جعل القانون الثاني في الديناميكا الحرارية مقبولاً. هذا يعني أن تهيج الجسيمات – دون – الذرية داخل الذرات يمتثل بإحكام لقواعد حتمية، غير أنه ليس لدى علماء الفيزياء الذي يقومون بملاحظاتهم من الخارج أمل في معرفة ما تنوي كل هذه الجسيمات القيام به. على هذا النحو تنبثق العشوائية عن الجهل. إذا قدّر لك بطريقة ما أن ترى داخل ذرة وأن تميز مكوناتها، فإنه يمكنك من حيث المبدأ أن تتابع حركتها وأن تتنبأ متى تنحل تلك الذرة بالذات.

ومهما يكن من أمر، كان مرتجى قصيًا لكنه مريح. لقد اكتفى معظم علماء الفيزياء

بتأجيل السؤال على اعتبار أنهم لم يكونوا في وضع يمكّن من تناوله بشكل مفيد. لفهم قاعدة الاحتمال الغريبة التي تحكم انحلال ذرات النشاط الإشعاعي، كان يتعين عليهم أن يفهموا أولاً كيف تكونت الذرة، وكيف تعمل.

الفصل الرابع

كيف يقرر الإلكترون؟

في سبتمبر عام 1911، وصل شاب دنمركي أوشك على بلوغ السادسة والعشرين من عمره إلى كيمبردج ليدرس علم فيزياء الإلكترون على يد جي.جي. تومسن. كان نيلز بور [Niels Bohr] ابن أستاذ في علم وظائف الأعضاء في جامعة كوبنهاجن، تتباهى أسرته، التي ترجع إلى ثلاثة أجيال، بأنها أنجبت مدرسين وأساتذة جامعة وكهنة. كان بور قد كتب أطروحته في توصيل الكهرباء في المعادن، مفترضًا أن الإلكترونات تحمل التيارات [الكهربية] وأنها تتحرك بدرجة أو أخرى من الحرية داخل الموصل، على طريقة ذرات الغاز تحلق إلى أعلى وأسفل في أنبوب. لم يفلح النموذج تمامًا، وقد أصبح بور يشك في وجود خطأ أساسي في طريقة التعامل مع الإلكترونات، وفق أسلوب القرن التاسع عشر، الذي يعتبرها كرات بليارد مشحونة كهربيًا.

عندما يكون في حال ارتخاء، تعلوه مسحة حزن. حاجباه الكثيفان معلقان فوق عينيه؛ فيما يتدلى على ركني وجهه فم أشد ثقلاً. حين يجهد نفسه في التفكر، تخمد ملامحه وترتخي ذراعاه على جنبيه. ووفق تعليق أحد علماء الفيزياء، فإن بور يبدو أحيانًا أبله. في سنين لاحقة اشتهر بكونه يتحدث بطريقة بطيئة، ومملة، ومبهمة على نحو يأسر مستمعيه أحيانًا ويثير سخطهم أخرى، ولذا فإنه من المفاجئ أنه أساء بعيد وصوله إلى كيمبردج إلى جي.جي تومسن بأن وجه إليه بعض الانتقادات الحادة لكتابه العظيم في توصيل الكهرباء عبر الغازات.

صادف بور صعوبة في التكيف مع أسلوب الحياة الإنجليزية. ترك مخطوط دراسة لـ جي.جي. كي يطلع عليها، وحين اكتشف بعد أيام أن المخطوط ظل في مكانه،

قرر أن يثير الأمر بشكل مباشر. لم يكن هذا سلوكا مقبولا. و لم يكن من جي.جي. في النهاية سوى أن قال إنه ليس في وسع شاب في عمر بور أن يعرف القدر الكبير الذي عرف عن الإلكترونات. حقيقة أنه كان أجنبيًا، فيما استنتج بور، لا تغير من الأمر شيئًا. حضر حفل غداء رسمي في ترنتي، الجامعة التي يدرّس فيها جي.جي.، غير أن أسابيع مرت دون أن يتحدث إليه أحد. استجاب جي.جي. لرغبة بور الجامحة في الجدل حول الفيزياء باتخاذ طريق آخر أنى ما رآه قادمًا نحوه. "مثيرة جدًا ... ولكن لا نفع منها"؛ هكذا وصف بور لاحقًا الفترة القليلة التي أمضاها في كيمبردج. لقد أصبحت عبارة "مثير جدًا" وسيلته المميزة في إنهاء المحادثة بطريقة دمثة حين يعرض عليه فرض مشكوك في أمره أو تأمل علمي خيالي.

رحل بور إلى مانشستر لزيارة أستاذ هناك، أحد أصدقاء أبيه الذي كان توفي مؤخرًا. في أحد الأيام، حين كان يتناول غداءه، قابل أرنست رذرفورد، الذي عاد قبل سنوات من كندا كي يتولى منصبًا في مانشستر، والذي تصادف أنه كان يعرف ذلك الرجل. بعد بضعة أسابيع، زار رذرفورد كيمبردج، وتحدث ثانية مع بور. يستبان أن رذرفورد في مانشستر، وليس تومسن في كيمبردج، هو من كان يقوم بالعمل الأكثر أهمية في إنجلترا. فضلاً عن ذلك، فإن رذرفورد لم يكن إنجليزيًا، وقد وجده بور ودودًا ومشجعًا. بحلول مارس 1912، استطاع بور تدبر أمر انتقاله إلى مانشستر، ظاهريًا كي يتعلم كيفية التجريب على النشاط الإشعاعي. وفي هذا الخصوص تبين أنه إن لم يكن عديم الفائدة، فإنه في أفضل الأحوال لا يحدث فرقًا.

مضى رذرفورد قدمًا في تقصيه للذرة. لقد استطاع قبل بضع سنوات، حين كان يعمل مع زميله الأصغر سنًا هانز جيجر [Gans Geiger] (الذي اشتهر بعداد جيجر)، أن يحدد تمامًا هوية إشعاعات ألفا. لقد اتضح أنها جسيمات أثقل بكثير من الإلكترونات، تحمل وحدتين موجبتين من الشحنات الكهربية. ولأنها واقعة في شرك ومتاح لها أن تصبح محايدة كهربيًا، تصبح جسيمات ألفا غير قابلة للتمييز من جميع الوجوه، أو هكذا اكتشف رذرفورد وجيجر من تقصي ذرات الهليوم. يستبان أنه في

حالة انحلال ألفا، تتحول الذرة الكبيرة إلى ذرة أصغر بعض الشيء بأن تقذف كتلة شبيهة إلى حد كبير بذرة الهليوم الخفيفة.

وبطبيعة الحال، لم يكن هناك من يعرف ماهية الذرة، غير أنه خطر لرذرفورد أن جسيمات ألفا قد تشكل مقذوفات ثقيلة جيدة لقصف أشياء أخرى، وذلك كي يعرف مكوناتها. هكذا قام صحبة جيجر وطالب جديد، اسمه أرنست مارسدن [Ernest Marsden]، بإجراء تجارب أطلق فيها جسيمات ألفا من مصدر إشعاعي نشط صوب رقاقة ذهبية دقيقة. جلس جيجر ومارسدن لساعات في الظلام، تتحسس عيونهم ومضات الضوء الصغيرة التي كانت تسطع حين تصطدم جسيمات ألفا بالشاشات الفسفورية المحيطة بالتجربة.

لم يكونا واثقين مما يتوقعان حدوثه. في معظم الوقت، كانت الجسيمات تنفذ عبر الرقاقة الذهبية الدقيقة كما لو أنها لم تكن هناك. أحيانًا تغير اتجاهها قليلاً أثناء مرورها، بحيث تخرج من الجانب البعيد بزاوية صغيرة. ما فاجأ المجربين هو أنه يندر تمامًا أن تفشل الجسيمات في النفاذ من الرقاقة بحيث ترتد منها. وكما يشتهر أن رذرفورد قد قال لاحقًا، لقد كان هذا "الحدث الأغرب في حياتي.. إنه ليس أقل غرابة من أن تطلق قذيفة حجمها 25 بوصة على قصاصة من نسيج ورقي فترتد وتصيبك".

كانت قصاصة الورق هي الرقاقة الذهبية ـ ولذا فإنها مجموعة من ذرات الذهب. قد تحتوي هذه الذرات على إلكترونات، غير أنه ليس في وسع جسيم ألفا أن يرتد راجعًا من إلكترون إلا بقدر ما يكون في وسع قذيفة مدفع أن ترتد من كرة تنس طاولة. فما الذي كان يعترض سبيل جسيمات ألفا؟

يرجح أنه كانت لدى رذرفورد أصلاً فكرة جيدة تمامًا عن الإجابة، غير أنه لم يشعر بالثقة الكافية لإعلان نتيجته إلا بعد عامين. محتم أن جسيمات ألفا التي تنحرف عبر زوايا كبيرة كانت تنحرف عن شيء أثقل بكثير منها. ذلك الشيء، فيما أعلن

رذرفورد عام 1911، هو نواة الذرة الدقيقة والكثيفة (رغم أنه لم يستخدم كلمة "نواة" إلا في العام التالي).

وكما في الكثير من لحظات العلم العظيمة، لم يثر هذا الإعلان ـ عن ولادة علم الفيزياء النووية ـ رد فعل مباشر قوي. في لقاء دولي عقد عام 1911، لم يكد رذرفورد يقول شيئًا، في حين قام جي.جي. بوصف عابر للمزيد من تفاصيل ذرة حلوى برقوقه القديمة. لم يكن رذرفورد منظِّرًا، غير أنه عرف أن مقترحه حول وجود النواة أغفل الكثير. تحديدًا، لم يكن لدى رذرفورد شيء يقوله عن مكملات الذرة من الإلكترونات الذرة: ما موضعها، في علاقتها بالنواة، وما الذي يمكنها أن تقوم به؟

حين ظهر نيلز بور في مانشستر، كان مساعد رذرفورد هو تشارلز جالتون داروين [Charles Galton Darwin]، حفيد رائد التطور. كان داروين يتفكر في الكيفية التي أبطأت بها جسيمات ألفا حركتها أثناء مرورها عبر مادة صلبة. إنها ألفا نادرة تلك التي تضرب نواة فترتد بقوة. في معظم الأحيان، تتحرك بغير انتظام ثم تتوقف، بعد أن تفقد طاقتها. مؤدى تفسير داروين هو أنها تتعرض لحالات صدام ضعيفة ومتكررة مع الإلكترونات الموجودة في الذرات، ما يجعلها تفقد طاقة صغيرة في كل مرة. بدراسة هذه العملية، كان يأمل أن يتحسن فهمه للطريقة التي ترتب وفقها الإلكترونات نفسها في الذرات.

تخيل بشكل غامض أنه في كل ذرة سحابة من الإلكترونات تحوم طليقة السراح ضمن موضع يمثل حجم الذرة الكلي. توجد نواة رذرفورد في المنتصف، وهي تحافظ على وحدة الكل بطريقة ما. ولكن حين حاول داروين مطابقة نموذجه مع المعدلات التي تم قياسها، والتي أبطأت وفقها جسيمات ألفا في مختلف المواد، حصل على أبعاد ذرية تختلف على نحو غير مرض مع الأحجام الذرية التي خلص إليها بسبل أكثر مباشرة.

تخيل بور في أطروحته صورة مشابهة تسرف في التبسيط ارتأى وفقها أن توصيل الكهرباء يتم عبر إلكترونات تهيم على وجهها في المعادن. لقد فشل هذا النموذج بدوره في تفسير ما كان يفترض فيه تفسيره. بدأ بور يتوجس من أن الخلل المشترك قد يتعين في أن الإلكترونات لم تكن قادرة على التحرك بحرية على النحو الذي افترض هو ودارون.

بطريقة ما لاحظ بور أنه يتعين على الذرة أن تمسك بزمام مجمل الإلكترونات، عبر نوع من القوة المقيدة. وهكذا افترض أن كل إلكترون لا يتحرك بحرية بل مقيد في موضع ما، يتذبذب جيئة وذهابًا، مثل كرة معلقة في نابض. لم تكن هذه سوى صورة، مرشد للخيال، غير أنها أعانته على التفكر.

بعد ذلك جاءت الخطوة الحاسمة والغاية في الغرابة. لقد اقترح بور أنه ليس بمقدور الإلكترونات أن تهتز بأي قدر من الطاقة نعني بتحديده. كل ما تستطيعه هو حمل الطاقة بأضعاف "كم" أساسي ما. حين تمر جسيمات ألفا عبر مادة صلبة، فإنها لا تستطيع أن تتخلى عن طاقتها للإلكترونات التي تصادفها إلا وفق هذه المقادير الكمية. اللافت أن بور قد اكتشف، بعد إضاعة بعض الوقت، أنه يستطيع أن يعد تصورًا أفضل للكيفية التي تبطئ بها جسيمات ألفا من حركتها. حائرًا، لكنه راض، كتب مخططًا لنظريته، أرسل بحثًا للنشر، ثم رجع إلى كوبنهاجن كي يتزوج مارجريت نورلند [Margreth Norlund]، أخت أصدقاء تعرف عليهم حين كان طالبًا جامعيًا.

ما ظل خفيًا حتى يومنا هذا هو السبب الذي جعله يتقدم بهذا المقترح المثير. صحيح أن فكرة كم الطاقة لم تكن جديدة. لقد سبق أن اقترحها ماكس بلانك [Max Planck] عام 1900 - ولكن في سياق مختلف تمامًا. لسنوات عديدة كان بلانك يجهد نفسه في حل مشكلة مقلقة. كان من المعروف جيدًا أن الأجسام الساخنة تتوهج كلما ارتفعت حرارتها عبر سلسلة من الألوان المميزة - من وهج الجمر الأحمر إلى صفرة الشمس إلى الأبيض–المزرق الخافت الذي يبدو به الفولاذ المصهور. قاس

علماء الفيزياء التجريبية بدقة طيف الإشعاع المنبعث ـ حيث أعدوا شكلاً لقدر الطاقة المنبعثة عند موجات طولية أو ترددات مختلفة. غير أن المنظّرين كانوا دومًا عاجزين عن تفسير شكل الطيف الذي قاسه زملاؤهم المجربون.

حاول بلانك، وقد أوشك على اليأس، أن يقوم بتقسيم طاقة الإشعاع إلى وحدات صغيرة. لم تكون هذه القسمة سوى حيلة رياضية لتبسيط الحساب. هكذا افترض أنه لو أمكن تحديد شكل الطيف المرجو، لتسنى استخدام الأساليب الرياضية القياسية في تقليص كتل طاقته الصغيرة إلى حجم متناه الصغر دون المساس بحله. غير أنه لم ينجح إلا في إنجاز نصف هذه المهمة. لقد تمكّن من اشتقاق الطيف الصحيح، ولكن في حال الحفاظ على وحدات الطاقة في حجم بعينه. ما جعله يتكدر طيلة حياته، هو أنه لم يتمكن من التخلص من هذه الكموم [quanta]، كما أسماها.

كان بلانك من النوع المحافظ. ليس هناك مبرر في الفيزياء القياسية يلزم بتقييد طاقة الموجات الكهرومغناطيسية على هذا النحو. لقد رفض الاعتقاد في أن الطاقة الكهرومغناطيسية، بطريقة جوهرية ما، لا توجد إلا في وحدات صغيرة. خلافًا لذلك اعتقد أن ثمة شيئًا ما بخصوص طريقة الأجسام المادية في إصدار الطاقة يجعل الإشعاع يظهر في شكل كميات منفصلة. ثمة فيزيائيون آخرون وافقوا على معظم ما طرحه من تصورات. في السنوات التالية بذل بلانك جهودا خارقة في البحث عن مبرر يفسر وجوب صدور الطاقة بهذه الطريقة المقطعة. لم يوفق، غير أنه لم يستسلم.

لأكثر من عقد، ظلت فكرة بلانك مبهمة وخلافية. على ذلك، وكما يتذكر بور، بقيت فكرة كموم الطاقة حاضرة على أقل تقدير. لم يبد تطبيق صيغة من الفكرة نفسها على الإلكترونات في الذرات مسرفًا في الخيال. لم يكن ليجد حرجًا في كونه لم يستطع تأمين أي مبرر حقيقي لمقترحه. غير أنه بدا أنه مقترح مفيد.

خلال بضعة أشهر تسنى لخصوبة الابتكار الاستثنائي أن تتكشف. هناك في كوبنهاجن، قبل بور منصبًا متواضعًا في الجامعة، تعين عبؤه الأكبر في تدريس الفيزياء لطلبة الطب. في أحد الأيام سأله زميل ما إذا كانت صورته الغريبة للإلكترونات الموجودة في الذرات تفيد بأية طريقة في تفسير شيء يعرف باسم سلسلة بالمر [Balmer] للخطوط المطيافية في الهيدروجين. اعترف بور خجلاً بأنه لا يعرف شيئًا عن هذه السلسلة، ثم ذهب إلى المكتبة كي يثقف نفسه.

لا شك أنه كان يعرف المطيافية [التحليل الطيفي باستخدام المطياف]. قبل قرن تقصى عالم الفلك الألماني جوزيف فون فرونهوفر [Joseph von Fraunhofer] طيف الضوء القادم من الشمس ولاحظ أن طيف الألوان، من الأحمر إلى البنفسجي، مرورًا بالأخضر. محدد بالمئات من الخطوط الداكنة الدقيقة. وكما اكتشف لاحقًا، فإن طيف النجوم اللامعة يعرض خطوطًا مشابهة، يتطابق بعض منها مع ما رآه في ضوء الشمس، فيما يختلف بعض آخر عنه. وعبر العقود التالية ثبت أن كل عنصر كيميائي يمتص ويبعث ضوءًا ليس بطريقة عريضة ومتصلة؛ بل في موجات طولية محددة الخواص: صفرة الصوديوم الخشنة؛ حمرة النيون الأنيسة؛ لون ضوء عطارد الغائم المزرق.

أمنت المطيافية لعلماء الكيمياء بوجه خاص أداة تشخيصية رائعة. بالنظر في ضوء عينة تم تسخينها، كانت تتسنى لهم معرفة العناصر التي تحتوي عليها. غير أن علماء الفيزياء لم يقتربوا من فهم السبب الذي يجعل الذرات لا تبعث ولا تمتص سوى تلك الترددات المتميزة، ولم يكن هذا سوى مهمة أخرى توكل إلى الذرة المحملة أصلاً بالكثير من الأعباء.

كانت سلسلة بالمر الإسهام الوحيد في العلم الذي قام به المدرس السويسري جوهان بالمر [Johann Balmer]. في عام 1885 استحدث معادلة جبرية بسيطة أعادت إنتاج، بدقة لافتة، ترددات سلسلة بارزة من الخطوط المطيافية التي يعرضها الهيدروجين. غير أن هذا كان مجرد علم أعداد، إذ لم يتضمن أي تبرير فيزيائي. في

السنوات السبع والعشرين التي مرت قبل علم بور بها، لم يقترب أحد من تفسير مصدر معادلة بالمر.

لكن هذا على وجه الضبط ما قام به بور، خلال بضع ساعات. بمزيج من الاستدلال الفيزيائي والتخمينات الملهمة، جعل نموذجه التمهيدي للذرة يستوعب معادلة بالمر عبر خطوات جبرية قليلة. وإذا كان رذرفورد، قبل عام أو عامين، قد استحدث علم الفيزياء النووية، فإن نيلز بور قد منح الآن للعالم علم الفيزياء الذرية.

عوضًا عن التفكر في الإلكترونات على أنها تتذبذب بطريقة غير محددة، أصبح بور يتصور الآن بشكل واضح أنها تدور في فلك النواة كما تدور الكواكب حول الشمس. وفي حين أن الجاذبية تحافظ على وحدة المجموعة الشمسية، فإن الجذب بين الإلكترونات المشحونة سلبيًا والنواة الموجبة يحافظ على النظام في الذرة. غير أن بور أصبح الآن يفرض شرطًا كموميًا حاسمًا: ليس في وسع الإلكترونات الدوارة أن تحوز على أية طاقة تشاء، بل لها فحسب أن تحوز فئة محددة من القيم.

إذا صحت هذه الوصفة، فإنه يتعين على الإلكترون المفرد في ذرة الهيدروجين أن يشغل فلكًا من مجموعة أفلاك متمايزة. وكلما كان قطر الفلك أكبر، تعاظم قدر طاقة الإلكترون المتحرك فيه. هكذا استبين لبور أن نموذجه قادر بشكل عجيب على تفسير المطيافية. حين تمتص الذرة قدرًا ضئيلاً من الطاقة، يقفز إلكترون فلك أدنى إلى فلك أعلى؛ إذ تدنى الإلكترون ثانية، تفقد الذرة القدر نفسه من الطاقة. غير أن حالات الامتصاص والفقد لا تحدث إلا بمقادير مثبتة، تمليها مجموعة الأفلاك الإلكترونية المقيدة. وبتعديل مناسب يمكن وضع هذه الأفلاك بحيث تعيد إنتاج سلسلة بالمر على وجه التحديد، أو هكذا اكتشف بور. ما حدث ليس فقط أنه استطاع تأمين أساس نظري لمعادلة بالمر. إنجازه الأعظم بكثير يتعين في أنه استطاع أخيرًا العثور على مبرر لوجود علم المطيافية أصلاً: إنه العلم المعني بانتقال الإلكترونات من فلك إلى آخر.

ما قلل من قدر استثارته هو أنه كان يدرك بوضوح أنه ليس في وسعه أن يوفر لنموذجه أساسًا فيزيائيًا مقنعًا. تبقى الإلكترونات في أفلاكها المخصصة لها لمجرد أن بور كتب معادلة تقول إنه يلزمها أن تقوم بذلك. وكما قال صراحة في بحث منشور، فإنه بخصوص هذا القيد "ليست هناك أية محاولة لطرح أساس ميكانيكي (فهو يبدو مستحيلاً)." لقد عمل النموذج بشكل جميل، غير أن بور لم يستطع أن يجازف بتخمين مأتاه.

عند كثيرين من العلماء الأكبر سنًا، ذرة بور ليست جديرة حتى بأن توصف بأنها نظرية في علم الفيزياء. اللورد ريلي [Rayleigh]، وهو عالم فيزياء متنوع الإنجازات بلغ من العمر سبعين سنة، قال لابنه "نعم، لقد اطلعت عليها، لكني لم أر فيها نفعًا لي. إني لا أقول إن الاكتشافات لا تكون على هذه الشاكلة، فأنا أعتقد أنه من المرجح أن تكون كذلك. غير أنها لا تناسبني". كان ريلي رجلاً متواضعًا يراعي مشاعر الآخرين، حكيمًا بمقاييس زمانه، ولم يكن رأيه في ذرة بور شجبًا بقدر ما كان قبولاً مكتئبًا لحقيقة أن عهده قد غبر.

ثمة نقد ثاقب مبكر جاء من رذرفورد، الذي أرسل إليه بور مخطوطًا مطولاً لأفكاره. حاول رذرفورد تقصير المخطوط، كي يشجع ما وصفه بعادة الإيجاز التي تميز الإنجليز، في مقابل الإسهاب الذي يسم الأوربيين، وقد فوجئ بإصرار بور العنيد على محاولة قول كل شيء بشكل يستوفي قدر الإمكان استحقاقات الكمال والاحتراز والدقة - بل الإسراف في الدقة حسب رذرفورد. من ضمن التعليقات أرسلها بور إلى رذرفورد فكرة عبر عنها بقوله: "يظهر أن هناك صعوبة كأداء. "كيف يقرر الإلكترون التردد الذي سوف يهتز به ومتى ينتقل من حالة سكون إلى أخرى؟ يبدو لي أنه يتوجب عليك أن تفترض أن الإلكترون يعرف مسبقًا الموضع الذي سوف يتوقف فيه".

التلقائية: ها هو هذا المفهوم المعيب يظهر ثانية. في ذرة بور، يبدو أن لدى الإلكترون الذي يتحرك في فلك عال الخيار بين الأفلاك الأدنى التي سوف يقفز

إليها، ومن ثم الخط الفاصل الذي سوف ينتج. في الانحلال الإشعاعي، كما عرف رذرفورد تمامًا، تتحلل ذرة غير مستقرة بعينها بالطريقة نفسها دائمًا، رغم أنه لا يمكن توقع توقيت هذا الحدث. يتبدى أن إلكترونات بور الوثابة لا تختار فحسب توقيت قفزاتها، بل حتى نهاية مطافها. لقد وجد رذرفورد هذا مدعاة للقلق.

غير أنه لم يكن المشكك الوحيد: في البداية ارتاب أينشتين في الذرة الجديدة. بيْد أنه نشر عام 1916 تحليلاً مستفزًا، بسيطًا بشكل مضلل لكنه موح بشكل قوي، جعله يفكر بشكل أكثر عمقًا في إنجاز بور. لقد تخيل ذرة بور مفردة تظهر في إشعاع كهرومغناطيسي، وتساءل عن الطريقة التي سوف يتم وفقها تبادل الطاقة جيئة وذهابًا. تحديدًا، تساءل عن الطريقة التي سوف يحصل فيها هذا النسق على اتزان حراري، بحيث غالبًا ما تعطي الذرة طاقة بقدر ما تأخذ، ويحافظ طيف الإشعاع على شكل ثابت، يميز درجة حرارة مثبتة.

من هذا الوضع البسيط استنبط أينشتين نتائج لافتة. بداية، يتعين على طيف الإشعاع في حالة التوازن أن يتخذ بشكل دقيق الشكل الذي قام بلانك عام 1900 بحسابه، وفق فرضه الكمومي. ثانيًا، لا تعطي ولا تأخذ الذرة طاقة إلا في وحدات تساوي تمامًا الفرق في الطاقة بين الفلكين - ما يعني أنها لا تستطيع مثلاً أن تطلق في الوقت نفسه كمومين من طاقة أقل يساويان المجموع الكلي نفسه.

لم تعزز هاتان النتيجتان فحسب حصول بلانك وبور على الأفكار الصحيحة، بل أنبأتا أيضًا بوجود علاقة عميقة بين مقترحيهما. غير أن هناك نتيجة ثالثة أزعجت أينشتين. لقد اكتشف أنه كي يكون توازن الطاقة بين الذرة والإشعاع على النحو الصحيح، يتعين أن يمتثل إصدار الذرة للطاقة لقانون احتمالي بسيط. وفق حساباته، احتمال إطلاق الذرة كما من الطاقة احتمال ثابت في أية فترة زمنية معطاة. لقد سبق له أن رأى ذلك من قبل. وعلى حد تعبيره، "القانون الإحصائي ليس سوى قانون رذرفورد في الانحلال الإشعاعي".

بكلمات أخرى، فإن كلا هاتين العمليتين - انحلال النواة الإشعاعي وقفز إلكترون من فلك إلى آخر - لم يكن تلقائيًا فحسب؛ بل تلقائيًا بالطريقة نفسها. ليس في أي من هاتين الحالتين أي وقت خاص يحدث فيه التغير - إنه يحدث فحسب، وليس لأي سبب واضح. هذا يعني فيما يبدو أن هذه الظواهر الفيزيائية تحدث دون أية علة يمكن تحديدها.

بعد عدة سنوات، حين ظلت الأحجية دون حل مناسب، كتب أينشتين إلى زميل له يقول "إن أمر السببية ذاك يسبب لي الكثير من القلق". لقد كان إلى حد كبير وحيدًا في قلقه، فمعظم علماء الفيزياء كانوا أكثر انشغالاً باللعب بذرة بور من أن يخوضوا وقتًا في إثارة هذه المسائل الميتافيزيقية. سوف يستغرق لحاقهم بعض الوقت.

الفصل الخامس

جرأة غير مسبوقة

في يوليو 1914، ترحل بور بذرته. صحبة أخيه الأصغر هارالد [Harald]، وهو عالم رياضيات واعد، سافر نيلز إلى ألمانيا لعرض أفكاره في جوتنجن وميونخ. كانت جامعة جوتنجن، التي تقع في وسط البلاد تقريبًا، معقل الرياضيات البحتة والفيزياء الرياضية. كارل فريدريك جوس [Carl Fredrich Gauss]، واحد من أعظم الرياضيين في التاريخ، وعالم فيزياء مبرز، درّس هناك العديد من السنوات، إلى أن توفي عام 1855. غير أن جوتنجن استسلمت منذ مطلع القرن العشرين إلى حالة التحنط التي تصيب غالبًا المؤسسات العظيمة عقب رحيل شخصية أسطورية (فكر في كيمبردج بعد جيل أو جيلين من نيوتن). تصادف أن هارالد بور كان في جوتنجن حين تم الإعلان أول مرة عن نموذج أخيه الذري، وقد أبلغ أخيه أن معظم الأساتذة هناك وجدوا المقترح "جريئًا" و"خياليًا" أكثر منه معقولاً. وفيما كتب هارالد إلى نيلز، قال عالم رياضيات ذو رتبة أكاديمية عالية ومزاج عكر، "في الوسع جعل أية أعداد تختار بشكل عشوائي أن تتفق بالطريقة نفسها" مع خطوط الهيدروجين المطيافية.

بعرض نظريته شخصيًا، أحرز بور بعض التقدم. ولأنه لم يكن أتقن بعد التحدث بالألمانية، تكلم بتؤدة وتردد، ولكن بتركيز لا تخطئه الأذن. وعلى حد تعبير عالم فيزياء ذي رتبة أكاديمية رفيعة اسمه آلفرد لاندي [Alfred Lande]، كان مفاد الرأي السائد بين أعضاء هيئة التدريس في جوتنجن أن مقترح بور كان "كله هراء ... مجرد

اعتذار رخيص عن جهله بما يحدث". ماكس بورن [Max Born]، الذي كان آنذاك أستاذًا في بداية الثلاثينيات من عمره، وجد نموذج بور الذري غير قابل للفهم إطلاقًا حين رأى مخطوطه أول مرة مطبوعًا، غير أنه بعد سماع بور يتحدث بحرية مدافعًا عنه، أخبر لاندي أن "عالم الفيزياء الدنمركي هذا يبدو مثل عبقري حقيقي، وهذا يجعلني عاجزًا عن إنكار أن ثمة ما هو مهم فيما يقول". لم تمض سوى بضع سنوات حتى أصبح كل من بورن ولاندي يسهم بنصيبه في نظرية الذرات الحديثة هذه.

لم يجد بور صعوبة مماثلة في ميونخ؛ حيث كان يوجد رئيس قسم الفيزياء النظرية آرنولد سمرفيلد [Arnold Sommerfeld] البالغ من العمر ستة وأربعين عامًا. رغم أنه أمضى عددًا من السنوات في جوتنجن، احتفظ سمرفيلد بحماس الشباب للجدة والابتكار. لقد كان ضمن أوائل مؤيدي نظرية أينشتين في النسبية الخاصة، حين كان علماء فيزياء آخرون من أبناء جيله يجدون صعوبة في قبول فكرة أن الزمان والمكان قد تغيرا. حين ظهرت ذرة بور على المشهد، أسرع إلى إخبار بور بأنه رغم الشكوك التي تساوره حول نموذجه، فإن قدرة هذا النموذج على استلزام نتائج كمية "إنجاز عظيم لا مراء فيه". في ميونخ، استقبل سمرفيلد بور استقبالاً حارًا، وشجع طلابه على التحول شطر الفيزياء الجديدة.

في أغسطس 1914، وهو شهر مشهود، غادر نيلز وهارالد ألمانيا كي يمضيا فترة قصيرة في ألب تيرولين. قرآ في الصحف تعليقات مخيفة عن حرب وشيكة وعلمًا أن من يمضون أجازة الصيف في مختلف أرجاء أوربا المتوترة قد رجعوا إلى أوطانهم. استقلا قطارًا ووجدا نفسيهما قد وصلا إلى ألمانيا بعد نصف ساعة من إعلان الحرب على روسيا. حين انتهى بهم المطاف إلى برلين، صادفوا حشودًا صاخبة، لا تني تدعو إلى بدء الحرب. لاحظ بور بطريقة جافة، "أنه من دأب ألمانيا أن تبدي مثل هذا الحماس بمجرد أن يكون هناك شاغل عسكري ما". بعد رحلة قلقة أخرى إلى الساحل الشمالي، استقلا عبّارة إلى الدنمرك التي كانت تنعم بالأمن.

مباشرة بعد ظهور بور أول مرة في أوساط الفيزياء الألمانية، قطعت الحرب لسنين معظم الاتصالات. في الوقت نفسه، حاول أن يجد لنفسه موضعًا أفضل في كوبنهاجن. لم يكن لديه معمل، ولأنه كان محملاً بأعباء تدريس الفيزياء لطلاب الطب، لم يكد يجد وقتًا للبحث. أسوأ من هذا أنه لم يكن لديه زملاء يتبادل معهم آراءه. بدأ في إطلاق حملة تحرض الجامعة على فتح معهد للفيزياء النظرية، غير أن الحرب الدائرة رحاها على الأبواب حالت دون إيلاء الحكومة الدنمركية العناية الكافية لهذا المشروع. رحب بور ممتنا بعرض قدمه له رذرفورد بالعودة إلى مانشستر. غير أن رذرفورد كان شرع آنذاك في إجراء أبحاث حول الحرب (حيث استحدث وسائل لاكتشاف الغواصات عبر الضوضاء التي تحدثها تحت الماء)، تاركًا لبور أمر إعالة نفسه.

عبر سني حياته، تعين نموذج بور المثالي في نهج العمل في إقحام نفسه في نقاش مستمر ومفتوح، حلقة نقاش غير رسمية ومفتوحة تعقد بشكل مستمر مع زملائه. كان يفكر بصوت عال، يطرح الأفكار، يعلق وينتقد، يقفز إلى الأمام، يستطرد، يتوقف ويتأمل. كان العامان اللذان قضاهما في مانشستر سعيدين على المستوى الشخصي نسبة له ولزوجته الصغيرة (التي قالت ذات مرة إن هذه المدينة الصناعية أقل فتنة من كيمبردج، غير أن أناسها أكثر دفئًا وحميمية). أما على المستوى العلمي، فقد كان يعاني من الوحدة.

رغم الحرب، واصل العلم تقدمه. معزولاً في ألمانيا، تحمس سمرفيلد لذرة بور. كانت الأبحاث والدوريات تنتقل جيئة وذهاب عبر الخنادق. لقد ظل بمقدور الأفكار أن تترحل حتى بشكل غير مباشر، استطاع بور أن يوقد جذوته في الآخرين.

لم تفسر ذرة بور الأصلية حقيقة سوى شيء واحد: سلسلة بالمر في خطوط الهيدروجين. غير أنه كانت هناك خطوط أخرى، ذرات أخرى، وحتى خطوط

بالمر لم تكن بالبساطة التي حسبها بور أول وهلة. وباستخدام مطياف ذي جودة عالية، اكتشف عالم الفيزياء الأمريكي آلبرت مكلسون [Albert Michelson] في عام 1892 أن الخطوط الفردية التي تتعرض لفحص دقيق تتكشف غالبًا في شكل خطوط مزدوجة ـ أي خطين متقاربين، يناظران تهيجات طيفية تحدث وفق ترددات مختلفة اختلافًا طفيفًا.

خطر لبور أن هذا الفصل بين الخطوط الطيفية قد ينشأ عن مدارين، أحدهما بيضاوي [اهليلجي] والآخر دائري. يحدث هذا لأن الإلكترونات تتحرك بسرعة كبيرة إلى حد يجعل تأثيرات بعينها في نسبية أينشتين مهمة. في ميكانيكا نيوتن، لا شيء يحول دون وجود مجموعة لا متناهية من الأفلاك، لكل منها الطاقة نفسها، مع اختلاف في درجة البيضاوية. لكل مجموعة فلك دائري واحد، درجة بيضاويته صفر. غير أن النسبية تجعل طاقة كل الأفلاك مختلفة قليلاً، وفقًا على هذه الدرجة.

هكذا تصور بور أنه إذا كان بالإمكان أن يكون للذرة فلك بيضاوي وآخر دائري، سوف يكون لها طاقتا نقل مختلفتان اختلافًا طفيفًا، وفقًا على أي فلك قفز إليه الإلكترون أو قفز منه. من شأن هذا أن يجعل الخط المطيافي ينفصل إلى اثنين. غير أن بور، الذي كان وحيدًا في مانشستر، وقع في مشكلة. لماذا يكون هناك فلك بيضاوي واحد فقط، وما الذي يحدد درجة بيضاويته؟ ثمة حاجة إلى قاعدة جديدة، ولم يكن في وسع بور اكتشافها.

نسبة إلى رجل يعد ضمن أعظم منظري الفيزياء، كانت قدرة بور محدودة بشكل لافت في مجالات الرياضة المتقدمة. أبحاثه لا تزيّن بمعادلات، فهو يطرح مفاهيم وافتراضات عامة ويحاول اشتقاق نتائج كمية بسيطة قدر الإمكان. خلال معظم سيرته العلمية، لم يكن قادرًا على تحويل تبصراته الفيزيائية اللافتة إلى حجج كمية إلا بمساعدة لفيف من المساعدين الموهوبين رياضيًا. لقد أسهمت هذه الطريقة في العمل

بطريقة ما في المنزلة الغامضة التي تنزلها بور. لقد بدا قادرًا على تمييز موضع حل المشكلة، رغم أنه لم يكن في وسعه أن يعرف على وجه الضبط كيف يصل إليه. بعد العديد من السنوات، كتب فرنر هايزنبرج عن محادثة أكد له بور فيها، ".. أنه لم ينجز النماذج الذرية المعقدة باستخدام الميكانيكا الكلاسيكية؛ بل كانت تجيء إليه حدسًا، على نحو يستلهم الخبرة، في شكل صور".

ولأنه لم يكن قادرًا على إتمام فكرته في الأفلاك البيضاوية، نشر بور مخططًا عامًا لمقترحه. وجد هذا البحث سبيله إلى ميونخ؛ حيث اطلع عليه عقل آرنولد سمرفيلد المدرب والثري. ولأنه تعلم في أفضل موروث ألماني، ولديه دارية معمقة بالأساليب الرياضية وتطبيقاتها على الميكانيكا، وبنظرية الكهرومغناطيسية، وأشياء كثيرة أخرى، كان سمرفيلد الرجل المناسب للقيام بالخطوة التالية.

بدمج فكرة بور في تحليل حاذق لميكانيكا أفلاك الذرة، استحدث سمرفيلد حجة وجيهة لتفسير لماذا يتعين على بيضاوية أفلاك الإلكترون أن تقيد بقيمة بعينها. البيضاوية، مثل حجم الأفلاك نفسها، أصبحت هي الأخرى "مكمومية."

أفضت أحاجي مطيافية أخرى إلى استدلال مشابه. حين وضعت الذرات في مجالات كهربية أو مغناطيسية، تضاعفت خطوطها المطيافية مثنى وثلاث، حتى بلغت توليفات أكثر تركيبًا. يعرف هذا باسم "تأثيرات ستارك وزيمان" [Stark and Zeeman]، تكريمًا لمكتشفيها على التوالي. إنها تنتج، وفق ما يقترح الآن سمرفيلد وآخرون، عن ضرورة أن توجد أفلاك الإلكترون في زاوية بعينها نسبة إلى تلك المجالات المفروضة بشكل خارجي، ووفقًا على الزاوية، تختلف طاقة الفلك قليلاً. مرة أخرى، لا تتاح للأفلاك إلا بزاوية بعينها. حتى الاتجاه أصبح مكمومًا في فئة من الأوضاع المتاحة.

في هذا النسق الأكثر تركيبًا، يستدعي تحديد أي فلك إلكتروني بعينه ثلاثة مما يسمى بالأعداد الكمومية. يشير الأول إلى حجم الفلك، والثاني إلى درجة بيضاويته، والثالث إلى اتجاهه. بمقدور قفز الإلكترون بين هذه الأفلاك المتنوعة أن يفسر حشدًا من الخفايا المطيافية.

روّعت بور رؤية قدرات ذرته على التوسع إلى هذا الحد وبهذه السرعة. "لا أعتقد أني قرأت أي شيء بالمتعة التي استشعرت حين اطلعت على عملك الجميل"، كتب قائلاً لسمرفيلد. لقد كانت إضافات سمرفيلد مهمة جدًا جعل الكثير من علماء الفيزياء يتحدثون عن ذرة بور – سمرفيلد.

تلك كانت سنوات انتصار ما أصبح يعرف بنظرية الكم القديمة. لا شك أن الأمر كان غريبًا. لقد خرجت ميكانيكا الأفلاك برمتها من رحم الفيزياء القديمة ـ فالإلكترونات تمتثل للقواعد النيوتونية (مع تعديلات يقوم بها أينشتين أحيانًا)، يحكمها قانون التربيع العكسي للتجاذب بين الإلكترونات والأنوية. ثم ظهرت القيود الكمومية. من ضمن نطاق لا نهاية له من الأفلاك الممكنة، لم يكن متاح سوى أشكال وأحجام واتجاهات بعينها. لقد اتسمت هذه القواعد الكمومية باتساق منطقي بعينه، غير أنها كانت في النهاية عشوائية، فرضت وفق أمر ما.

مفهوميًا، لم يكن يحوز هذا الهجين المعيب من القديم والجديد معنى منطقيًا. ما مصدر هذه القواعد الكمومية؟ وكما تساءل رذرفورد، كيف يقرر الإلكترون متى يقفز وإلى أين يقفز؟ هل كانت هذه القفزات مستحثة بطريقة مجهولة ما، أو أنها ـ كما خشي أينشتين ـ تلقائية حقيقة وغير قابلة للتنبؤ في النهاية؟

لم يكن لدى أحد فكرة ولو غامضة عن السبيل للإجابة عن هذه الأسئلة الغريبة وغير المسبوقة. غير أن ذلك لم يكن بالأمر المهم آنذاك! لقد فسرت ذرة بور – سمرفيلد بشكل رائع كل سلوكيات الغوامض المطيافية التي لم يسبق فهمها. لقد قامت بمهمتها بطريقة جيدة تستعصي على التفسير، بطريقة جيدة لا تستحقها.

لم يكن ظهور ذرة بور – سمرفيلد علامة فحسب على نضج نظرية الكم فحسب؛ بل إزاحة تاريخية لمركزية الفيزياء النظرية الجغرافية من بريطانيا العظمى إلى قارة أوربا، خصوصًا ألمانيا. كانت النواة الذرية تتاجًا أصيلاً للإمبراطورية البريطانية، حملها رذرفورد، وهو نيوزيلندي، بعد عمل أنجز في كندا وإنجلترا. لقد كان يمكن لذرة بور البدائية أن تزعم على نحو مماثل نسبًا بريطانيا، كونها انبثقت بشكل كبير عن اتصال مع رذرفورد وداروِن. غير أن أفكار بور في زمن الحرب، حين مكث في مانشستر، كانت تجذرت في ألمانيا؛ حيث أثمرت نظرية الكم القديمة في الذرة.

ظل نيلز بور طيلة حياته نصيرًا متحمسًا لرذرفورد، الذي قابله أول مرة بعد وفاة أبيه والذي وصفه بأنه "تقريبًا مثل أب ثان له". عبر السنين ظل يبلّغ رذرفورد بما يستجد في عمله في الذرة من تطورات، وقد قال له في بداية عام 1918 "إنني في الوقت الحالي في أوج التفاؤل بخصوص مستقبل النظرية." كان رذرفورد يرد عليه مشجعًا، غير أنه كان في واقع الحال رجلاً عمليًا، مجربًا. لقد قال لزملائه في كيمبردج إن منظري الكم "يمارسون اللعب برموزهم، غير أننا في كافيندش نثبت حقائق الطبيعة الصلبة". كان رذرفورد، بأسلوبه المندفع، يفضل قول إنه ينبغي على كل عالم فيزياء جدير بهذا اللقب أن يكون قادرًا على تفسير أبحاثه إلى نادلة البار، وإلا ما جدوى ما يقوم به؟ في المقابل، واجه بور صعوبة كبيرة في تفسير نظريته الفيزيائية لزملائه. ولكن طالما ظل قادرًا على توصيل أفكاره إلى رذرفورد، لعله كان في مكنته أن يشعر بأنه يقف على أرض صلبة.

في عام 1916، عاد بور إلى محبوبته كوبنهاجن محملاً بخطط تتعلق باستيفاء معهده استحقاقات الموافقة الرسمية (وبعد رفضه عرضا بالبقاء في مانشستر أو الانتقال إلى بركلي، كاليفورنيا). في كوبنهاجن سوف يؤسس معهدًا لتشكيل نظرية الكم. غير أن ذلك يستغرق وقتًا طويلاً، وفي حين كان بور يتصارع مع البيروقراطية فضلاً مع البحث، كان سمرفيلد صحبة طلابه في ميونخ يتولون القيادة.

في الوقت نفسه، في بريطانيا العظمى، كانت النظرية تعاني من بعض الثغرات. لعل الموروث البريطاني في الفيزياء الرياضية، مثل الإمبراطورية نفسها، كان قد تعرض للإجهاد والاستنفاد. لقد رحل عمالقة الجيل الأسبق. كانت إنجازات بريطانيا القرن التاسع عشر الباهرة، في الكهرومغناطيسية، والبصريات، والصوتيات، وديناميكا الموائع، وغيرها، أعمالاً يصعب القيام بمثلها. بعض من بقايا أصداء فيكتورية ظلت قوية هناك، روح عملية متحدية، حماسة، mens sana in corpore sano [عقل سليم في جسم سليم]. يتعين على النظرية، في الأسلوب الكلاسيكي، ألا تنأى كثيرًا عن أحكام الفطرة. لقد بدت أفكار نظرية الكم الجديدة ـ مثل الفن الجديد والموسيقى الجديدة ـ طليعية بشكل خطر، منعزلة عن النظريات المألوفة التي حققت نجاحًا جيدًا حتى آنذاك. لقد ازدهرت الفيزياء التجريبية، خصوصًا الفيزياء النووية، في بريطانيا تحت إمرة رذرفورد القوية، الذي خلف جي.جي. تومسن عام 1919 في رئاسة معمل كافندش. غير أن النظرية ـ النظرية العميقة، النظرية الحديثة ـ بدأت تذوي.

في الأثناء، لم تكن ألمانيا بحال صفحة بيضاء. في كل من النظرية والتجربة، حظي علماء الفيزياء الألمان بسمعة طيبة. فضلاً عن ذلك، كانت تدور في العالم الذي يتحدث الألمانية معركة قاسية حول معنى النظرية ـ وهذا جدل يعترف معظم العلماء البريطانيون بأنه كان مسليًا، نوع من الجدل غير السوي الذي يمكن أن يخوض فيه الألمان ذوو الميول الفلسفية، وليس الأنجلوسكسون الخلص. لقد تصادم لودفيج بولزمان ذو الإيمان الراسخ بواقعية الذرات، مع زميله النمساوي عالم الفيزياء-الفيلسوف أرنست ماخ [Ernest Mach]، زعيم أنصار أيديولوجيا الوضعية. عند

ماخ، لا تضمر النظرية معنى عميقًا حول البنية الأساسية في العالم المادي. النظرية مجرد مجموعة من العلاقات الرياضية التي تربط بين الظواهر المحسوسة. لهذا فإن الذرة في أفضل الأحوال خيال مريح، وفي أسوئها فرض غير قابل للتحقق منه.

كسب الذريون المعركة. لقد أكسب صراع بولزمان متعاطفين وحلفاء في أوساط علماء الرياضيات البحتة، الذين أثارهم أن يروا علماء الفيزياء يقومون باستخدام واضح المعالم لمبادئ ومبرهنات بدا أنها لا تنتمي إلى سواهم. بحلول مطلع القرن العشرين، أصبح المنظّرون الألمان مغامرين رياضيًا على نحو يختلف مع معظم نظرائهم البريطانيين.

ثم قامت الحرب العالمية الأولى، الحرب التي أنهت كل الحروب. في البداية، سارت الحرب على نحو أسرّ الألمان، الذين تخيلوا أن الثقافة والحضارة الألمانية على وشك أن يلقيا بظلالهما على الثقافات الأنجلو - سكسونية التي أعياها التعب. غير أن هذا التوقع خاب عام 1918، حين انهارت السلطات الألمانية، ثم استسلمت تقريبًا قبل أن يعرف شعبها أن ثمة خللاً ما.

في أكتوبر 1914، حين بدا المستقبل مجيدًا، كان ماكس بلانك واحدًا من ثلاثة وتسعين مثقفًا ألمانيًا بارزًا وقعوا على "دعوة إلى شعوب العالم المتحضرة" [Appeal to the Cultured People of the World]. لقد عرض هذا البيان المؤسف، الذي نشر في الصحف في أرجاء البلاد، مناقب القضية الألمانية، صفات التفوق العديدة في الحضارة الألمانية، والاحترام المتعاطف الذي يكنه الألمان للإنجازات الثقافية التي حققتها أمم أقل شأنًا. سبب هذا البيان هو قيام القوات الألمانية بتدمير المكتبة التاريخية في لوفين، ببلجيكا. أنكر بلانك وزملاؤه أن يكون الألمان المثقفون المتحضرون قد قاموا بمثل هذا الاعتداء، كما أنكروا تقارير تفيد أن المدن والقرى البلجيكية قد

دمرت؛ بل إنهم ذهبوا إلى أن ألمانيا ليست سوى ضحية محتال عليها ولا إرادة لها لمذبحة أصبحت تجتاح أوربا بأكملها.

بعد أربع سنوات، وبعد أن دمرت البلاد وتضور شعبها جوعًا، وأصبحت الثورة الاشتراكية المشتعلة تثير حركات ارتجاعية في المدن الفوضوية، اتضح أن تلك الوثيقة مدعاة للرثاء بقدر ما هي مخزية. فيما بعد، زعم بلانك أنه لم يقرأ الدعوة بشكل مناسب، وأنه وقع عليه بسبب القائمة المميزة التي سبقته في التوقيع عليه. غير أنه بدأ خلال الحرب في التقليل من قدر تشيعه غير المتفكر فيه للوحدة والغاية الألمانية، واعترف في رد على رسائل بعث بها زملاء في بقاع أخرى من أوربا بأن الجنود الألمان لم يلتزموا دومًا بالمعايير السامية التي أعلنت عنها ذلك الدعوة.

وحتى إن يكن، فإن الروح الكامنة خلف الدعوة ظلت باقية بطريقة واهنة بعض الشيء. ربما دمرت ألمانيا، غير أنه يتعين على ألمانيا الثقافة أن تستمر. لقد كانت البلاد في أعقاب الحرب حطامًا، على المستوى الاقتصادي والسياسي والنفسي. خلال ما يعرف بـ "شتاء اللفت" (1916—1917)، تضور الشعب جوعًا وتجمدت أطرافه، فيما ظل هناك نقص في الغذاء حتى بعد الحرب. لقد تفككت المؤسسات السياسية، وخاضت الأحزاب المتنافسة، من الملكية المتطرفة إلى الشيوعية المتشددة، في أعمال عنف واغتيالات كانت تتم على أيدي رجال عصابات. لم يبد سائر العالم أي تعاطف. لقد جنت براقش على نفسها، فيما فرضت معاهدة فرساي الشاقة تعويضات هائلة على بلد مسلوبة القوى، وأصبحت ألمانيا بلدًا منبوذًا، مبعدًا عن عصبة الأمم الطالعة آنذاك. في العالم العلمي، نفي الألمان دون محاكمة، ولم يتح لهم الاشتراك في المؤتمرات الدولية، فيما رفضت الكثير من المجلات نشر أبحاثهم.

في خضم هذا الاضطراب المعتم، فيما اعتقد بلانك وآخرون، يمكن للعلم أن يكون منارة للمستقبل. في نهاية عام 1919، وفي صحيفة يومية تصدر ببرلين Berliner tageblatt، أفصح بلانك عن ثقته في أنه "طالما استمر العلم الألماني على عهده، من

غير المرجح أن تستبعد ألمانيا من مرتبة الدول المتحضرة". ومثل عدد من الألمان الذين كانوا في البداية مؤيدين خلّصا للحرب، قرر بلانك أن الحرب كانت عملاً منحرفًا، مغامرة كارثية خاطئة فرضتها على الشعب كرهًا عسكرتارية مسعورة. والآن وبعد أن وضعت الحرب أوزارها، بمقدور الاعتزاز والشرف والموروث الألماني أن تعيش على العلم، أو هكذا ارتأى بلانك. العزلة التي فرضها العالم الخارجي جعلت العلماء الألمان أكثر تصميمًا على الحفاظ على مهنتهم، ومعها جزء من شرف بلادهم.

شهد عام 1919 حظوة أعظم منظري ألمانيا، آلبرت أينشتين، بشهرة دولية. وكانت نظرية أينشتين العامة في النسبية قد حصلت على على تأييد رافقت الإعلان عنه دعاية إعلامية صاخبة، بسبب شواهد ملاحظية (تتعلق بانحناء الضوء بسبب جاذبية الشمس) جمّعها عالم الفلك البريطاني آرثر ادنجتون [Arthur Eddington]. غير أن ألمانيّة أينشتين كانت مسألة دقيقة. لقد ولد في الجنوب الغربي من ألمانيا، ودرس فترة في ميونخ، غير أنه تمرد على التحجر الفكري والشطط العسكري في تدريسه، وحين بلغ عمره خمسة عشر عامًا فر إلى ميلانو، بإيطاليا؛ حيث سبقه أبوه كي يؤسس تجارة في المواد الكهربية. بعد ذلك سجل أينشتين في معهد سويسري للمهن التقنية الشاملة في زيورخ، واستطاع بذكائه الحصول على الجنسية السويسرية، متخليًا بذلك عن جواز سفره الألماني. غير أنه بنهاية الحرب تمكن بسبب شهرته من الحصول على منصب في مركز العلم الألماني، أستاذًا في برلين. في تلك الآونة، كانت ألمانيا تفتخر بكونه واحدًا من أبنائها.

في السياسة كما في العلم، كان أينشتين شخصية مستقلة، يسمو على الاعتبارات القومية والشوفونية. لقد كان ينفر من العسكرتارية، غير أنه لم يوافق على العزلة العلمية التي تعرضت لها ألمانيا بعد الحرب، فهو لا ينجح إلا في إطالة أجل روح العداوة والمشاعر غير السوية، أو هكذا أفكر، وقد كان محقًا إلى حد كبير. ورغم أنه لم يكن يكّن حبًا للعلماء الألمان المسرفين في مشاعرهم الوطنية ـ عما قليل سوف يقوم جوهانز ستارك [Johannes Stark]، مكتشف تأثيرات ستارك، بدور قيادي

في إدانة "علم النسبية اليهودي"، ثم نظرية الكم ـ ابتعد أينشتين عن عدد من اللقاءات الدولية بحجة أنه تم إقصاء كل الألمان، بصرف النظر عن ميولهم السياسية، ومواقفهم من الحرب، وعن الجهود الراهنة التي تبذل لاستعادة علاقات ألمانيا الودية مع بلدان العالم.

؛ شكل ذيوع صيت أينشتين على المستوى العالمي ضغوطًا على رؤاه السياسية بقدر ما أثر في إمرته للنسبية في المشهد العام. نتيجة لذلك، أصبحت بعض من إنجازاته العلمية الأخرى في الظل. وبظهور نظرية الكم تعين دور أينشتين الحاسم في تحويل حصص الطاقة الصغيرة الغامضة إلى وحدات ذات معنى مادي من الإشعاع الكهرومغناطيسي. في عامه المعجز، 1905، أسس بحثان من أبحاث أينشتين الأسطورية الأربعة النسبية الخاصة (يشمل البحث الثاني القصير أشهر معادلة علمية في العالم، E = mc2 [الطاقة = حاصل ضرب الكتلة في مربع سرعة الضوء]. وكما نعرف، فإن البحث الثالث يتناول الحركة البراونية. أما الرابع فقد عني بما أسماه "كموم الضوء". لقد دافع عن وجوب فهم حجة بلانك عن حزم الطاقة الصغيرة على ظاهرها: تعامل مع حزم الطاقة كما لو أنها أشياء صغيرة حقيقية، واستخدم الأساليب الإحصائية القياسية التي طورها بولزمان وآخرون، وسوف تظهر بشكل صحيح الكثير من الخصائص المثبتة للإشعاع الكهرومغناطيسي. بإقرار أن الضوء مكون من حزم طاقة صغيرة، تمكن أينشتين بسهولة من تفسير تفاصيل كانت مربكة تتعلق بالأثر الكهرو–ضوئي، حيث يولّد الضوء الذي يقذف على معادن بعينها جهودًا كهربية صغيرة.

غير أن الاعتقاد في كموم الضوء يتعارض مع النجاح الهائل والمستمر الذي حققته النظرية الموجية الكلاسيكية التي قال بها ماكسويل في المجال الكهرومغناطيسي . أكثر من ذلك، فإن حمل كموم الضوء محمل الجد يجلب إلى الفيزياء مشكلتين مرتبطتين: الانفصال وعدم القدرة على التنبؤ. الموجات الكلاسيكية تسلك دومًا بشكل سلس، تدريجي، ودون فجوات. كموم الضوء، إذا كان ثمة شيء من هذا القبيل، تجيء

وتغدو بشكل مفاجئ، دون أي مبرر أو سبب ظاهر. هذا مكمن الإشكال الذي سوف يزعج أينشتين بقية حياته. لقد اعتقد في حقيقية كموم الضوء قبل أي شخص آخر، غير أنه تمرد بشكل أعنف من أي شخص آخر ضد الحكم الضمني القائل إن كموم الضوء حتمًا سوف تجلب التلقائية والاحتمال إلى الفيزياء.

بسبب إصراره على واقعية كموم الضوء، كان على أينشتين أن يعبر وحيدًا ولعدة سنوات طريقًا موحشة وكئيبة. في الأثناء، بقي الإشعاع الكهرومغناطيسي، والنشاط الإشعاعي، وبنية الذرات؛ بل بنية الفيزياء الأساسية بوجه عام، مصدرًا لحيرة علماء الفيزياء. المنظّرون، فيما يأسى بلانك عام 1910، "يعملون الآن بجرأة غير مسبوقة في الأزمنة القديمة؛ في الوقت الحاضر لم يعد هناك قانون فيزيائي جدير بالثقة المطلقة، فكل وأي حقيقة فيزيائية قد تكون موضع خلاف. غالبًا ما يبدو كما لو أن زمن الفوضى يقترب ثانية من الفيزياء النظرية".

في عام 1916، في شيكاغو، قام روبرت أي. ميليكان [Robert A. Milikan] بقياس دقيق للأثر الكهروضوئي وأثبت بشكل لا مراء فيه أن "معادلة أينشتين الخاصة بالكهرو – ضوئية .. تبدو في كل حالة قادرة على التنبؤ بدقة بنتائج ملاحظية". غير أنه استنتج، بطريقة لا تخلو من عناد "أن نظرية شبه الجسيمات الدقيقة التي أشتق منها أينشتين معادلته تبدو في الوقت الراهنة غير قابلة لأن يدافع عنها". ورغم الشواهد، كان العديد من علماء الفيزياء أنزع إلى الاتفاق مع ميليكان منهم مع أينشتين.

وزيادة في الإرباك، لم تحظ ذرة بور – سمرفيلد إلا بسنوات قليلة من النجاح المتصل. لقد أنجزت علميًا ما يحول دون التغاضي عنها. ولكن في مطلع العشرينيات من القرن العشرين، لم تعد هناك ثقة كافية في قدرتها على أن تقوم بأكثر من تفسير حالة الهيدروجين البسيطة، التي تفسرها بشكل غير كامل. بدأ بعض العلماء الفيزياء يرون أنها قد تكون مجرد مرحلة مؤقتة. لعل لغة التحولات والقفزات المقلقة، لغة

الكموم والتلقائية، سوف تختفي قريبًا، بحيث يتسنى لعلماء الفيزياء التعامل ثانية مع ما ألفوا من يقينيات سالفة.

في نهاية الحرب، أشرف آرنولد على اثنين من الطلاب الواعدين الجدد، وفي عام 1918، وصل ولفجانج بولي [Wolfgang Pauli] من فينا. بعد عامين، ظهر فرنر هايزنبرج، وهو شاب محلي. ولأنهما لم يكونا محملين بأعباء الماضي، لن يلبث حتى يستشعر الآخرون حضورهم.

الفصل السادس

عوز المعرفة لا يضمن النجاح

إذا كان ماكس بلانك قد تشبث بثقافة العلم سبيلاً للنهوض من عار سقوط ألمانيا، فقد وجد شباب من أمثال ولفجانج بولي وفرنر هايزنبرج في مواصلة العلم مهربًا شخصيًا من شظف العيش في السنوات الكالحة التي أعقبت الحرب. كان كلاهما يحظى برغد العيش ابنا لأستاذ جامعي. غير أن كليهما التحق بجامعة ميونخ في وقت لم تقاوم تلك المدينة الجوع إلا لتسقط صريعة فوضى عنيفة، ولدورة من الأعمال الثورية والقمعية تتخللها عمليات اغتيال. وحين كان الواحد منهما يسرد ذكرياته، أو يجري مقابلة ما، لم يكن يتحدث طويلاً عن هذه الظروف الصعبة. عند هذين الشابين، كانت الحياة تعني العلم، روائعه وإحباطاته. لقد منحهما العلم الغاية والحرية.

أسهمت أصول بولي بوجه خاص في سيرته المهنية اللاحقة. كان أبوه أستاذًا جامعيًا يدرّس علم الطب الكيميائي في فينا، زميلاً لارنست ماخ، ولعله كان أقرب لأن يكون أحد حواريي هذا النصير القديم للوضعية. في عام 1900 طلب من ماخ أن يكفل وليده الجديد. كان آل بولي آنذاك كاثوليكيين صبأوا عن اليهودية كي يأمّنوا أنفسهم ضد الحركة المعادية للسامية التي اجتاحت المجتمع في فينا. لقد شكل اليهود النمساويون الذين تحولوا عن دينهم في تلك الآونة نسبة بلغت 10 بالمائة.

وكما قال الشاب بولي بعد سنين، لم يكن ماخ "مجرد كاهن كاثوليكي"، وهكذا بدا أنني بدلاً من أن أعمّد كي أكون كاثوليكيًا رومانيًا، عمّدت بحيث أصبح "مناوئًا للميتافيزيقا" لقد وصف ماخ نفسه بأنه مناوئ للميتافيزيقا لأنه دان كل اقتراح

يقول إنه بمقدور النظرية ألا تقتصر على تفسير الحقائق التجريبية، وأن تذهب إلى حد كشف النقاب عن أسرار الطبيعة؛ حيث اعتبره اقتراحًا ميتافيزيقًا. لم يكن في وسع بولي أن يتأسى بعرّابه في اعتناق النزعة ضد–الذرية، غير أن إسراف ماخ في معاداته للميتافيزيقية تطور عنده في شكل نوع من الريبة الشاملة، تشكيك في التنظير الذي ينأى عن العيني والقابل للبرهنة. في الأيام الأولى لنظرية الكم ، كانت هذه منقبة خلافية. حسب هايزنبرج، أراد بولي أن يلتزم بشكل صارم بالمعطيات التجريبية وأن يحافظ على الإحكام الرياضي، وأن يظل عالمًا ارتيابيًا متطورًا ذا مطالب عصية التحقق. لقد نشر بولي أقل مما كان له أن ينشر، فيما يقول هايزنبرج، لأن أفكارًا قليلة استوفت معاييره المدققة. غير أنه كان ناقدًا ومشرفًا ثاقبًا، حتى أنه أصبح لاحقًا يعرف باسم "ضمير الفيزياء".

في المدرسة الثانوية، في فينا، سطع نجم ذكاء بولي في الفيزياء والرياضيات منذ البداية. عبر نفوذ أبيه تلقى دروسًا خصوصية متقدمة على يد بعض أساتذة الفيزياء في الجامعة، وعندما تخرج كان أنهى بحثًا مقنعًا في موضوع النسبية العامة الجديد. وحين تعلق الأمر بمواصلة تعليمه، لم تكن جامعة فينا بقادرة على أسر إعجابه. كان لودفيج بولزمان قد انتحر عام 1906، بسبب عيشه حياة مزجت بين الكآبة، ووساوس المرض، وتهتك عصبي وصفه هو نفسه، أججته عداوة مستمر من ماخ وخصوم النزعة الذرية. و لم يكن قسم الفيزياء في فينا سوى محاكاة شاحبة لوضعه السابق. لم يطور بولي أي ارتباط عاطفي مع المدينة. كانت السياسة في فينا فوضى، فيما كان المجتمع أشبه بالأسمال البالية. وإلى حد كبير، كان كل هذا يصدق على ميونخ. على ذلك كان في الجامعة على أقل تقدير قسم مزدهر ومغامر في الفيزياء النظرية يقوده سمرفيلد. في عام 1918، حين لم تكن الحرب قد انتهت حقيقة، سافر ولفجانج بولي إلى ميونخ والتحق بالجامعة طالبًا. ولأنه استبين أنه يعاني من ضعف في القلب، استطاع تجنب الالتحاق بالخدمة العسكرية في آخر سني الحرب.

وصل بولي إلى بلد على حافة الانهيار. في ميونخ، في الثامن من نوفمبر، أعلن الزعيم الاشتراكي كرت اسنر [Kurt Eisner] جمهورية سوفيتية في بافاريا، بعد

أن أطاح بالملك لودفيج الثالث. في اليوم التالي قام جمع من الديمقراطيين المعتدلين التقوا في فيمار بتأسيس ديمقراطية جديدة في ألمانيا. بعد يومين أعلنت الهدنة، بعد أن تخلى القيصر فيلهلم [Kaiser Wilhelm] في برلين كرهًا عن عرشه. لم يبد أن هناك من يتولى مقاليد الحكم. لقد أراد الجناح اليميني استعادة الملكية، فيما أراد الجناح اليساري أن تكون ألمانيا بلدًا شيوعيًا حقيقة. في فبراير 1919 اغتيل اسنر على أيدي الرجعيين. أعلنت جمهورية شعبية ثانية في بافاريا في أبريل، جلبت معها فترة قصيرة من الإرهاب الأحمر حين أطاح اشتراكيون وشيوعيون بالنظام القديم بدافع الانتقام. لقد كانت فترة قصيرة لأن العسكريين عادوا لسحق الاشتراكية بعد أسبوعين، ولكي يجتثوا الكارثة الشيوعية، انخرطوا في إرهاب أبيض لا يقل فظاعة.

يذكر هايزنبرج، الذي كان آنذاك تلميذًا في المدينة، أن "ميونخ كانت تمر بحالة فوضى شاملة. في الشوارع كان الناس يطلقون النار على بعضهم البعض، و لم يكن بمقدور أحد أن يعرف على وجه الضبط هوية المتحاربين. لقد كانت القوة السياسية تتداول بين أشخاص ومؤسسات لم يكن في وسع سوى نزر قليل منا تسميتها".

شهد أغسطس 1919 الإعلان عن دستور فيمار [Weimar Constitution]، الذي كان تسوية لتحقيق الديمقراطية لم تكد تسعد أحدًا. تاق المعتدلون الذين كانوا أميل إلى اليمين، مثل ماكس بلانك، إلى اليقينيات المدينية التي عرفتها ألمانيا القديمة، واعتبروا الديمقراطية تعبيرًا مؤدبًا لوصف حكم الرعاع. أما اليسار، الجاد في طلب الاشتراكية، فقد شجب الديمقراطية بوصفها بديلاً ضعيفًا على نحو يدعو للشفقة. في انتخابات السنة التالية، كانت نتائج المتطرفين على الجانبين جيدة، في حين كان أداء الوسط المعتدل، الذي لم يحبه أحد، سيئًا.

غير أن هدوءًا حذرًا وهشًا عاد ببطء. لم تكن ألمانيا فيمار مستقرة حقيقة أبدًا، غير أن الألمان بدأوا تدريجيًا في اكتساب الثقة في أن بلدهم لن تنهار اليوم التالي. في ميونخ، اكتشف العالمان الواعدان بولي وهايزنبرج، بعد أن بذلا ما في وسعهما

من جهد للتغاضي عن الفوضى المحيطة بهما، أن بمقدورهما أن يجدا براحا أوسع للتنفس.

دعي سمرفيلد للإسهام بدراسة موسوعية عن النسبية، فأحال هذه المهمة إلى طالبه المحترز الجديد - "شخص مدهش حقًا" - الذي سبق له أن كتب في هذا الموضوع. على هذا النحو، ألف ولفجانج بولي، الذي كان مجرد طالب جامعي، ما كان في واقع الأمر كتيبًا صغيرًا في النسبية، عرض فيه علومها الرياضية والفيزيائية بوضوح وأناقة أدهشت أينشتين نفسه.

سرعان ما اكتشف بولي أن النسبية العامة ليست الموضوع الذي يناسبه. رغم أنها مثيرة للإعجاب على المستوى الفكري، كانت نظرية منجزة، كما أنها لا تفضي إلى نتائج عملية. (سوف تمر عقود قبل أن تصبح لغة النسبية العامة شائعة في الفيزياء الفلكية وعلوم الكون، وهما تخصصان لم يكونا قد وجدا في العشرينيات). في ميونخ، وتحت إشراف سمرفيلد، لم يكن بالكاد في وسع بولي سوى أن يختار نظرية الكم بديلاً، بسبب ما تشمله من نتائج غامضة، ومشاكل لم تحل، ونظريات نصف ناضجة. لقد تقصى جزيء الهيدروجين المؤيّن - نواتان تشتركان في إلكترون مفرد - الذي أثار مشكلة صعبة بدت جديرة بالاهتمام. استحدث نماذج مفصلة وبارعة، كي يفسر كيف يدور الإلكترون في هذا النسق المزدوج، ويفهم كيف تنطبق قواعد الكم على الأفلاك. غير أنه لم ينجز سوى تقدم محدود.

على ذلك ظل اهتمامه مأسورًا. بدأ يأنف من برنامج سمرفيلد: تقصي البيانات المطيافية للعثور على أنماط يستطيع تأويلها على أنها قواعد كمومية. بالانتقال من الهيدروجين والهليوم إلى مجموعات أخرى من عناصر الجدول الدوري، حاول سمرفيلد استنباط تواترات حتى في الحالات المعقدة. جمع اكتشافاته في دراسة بعنوان Atomic Structure and Spectral Lines [البنية الذرية والخطوط المطيافية] - أصبحت تعرف بإنجيل سمرفيلد - حيث ربط جهوده بشكل واع ببحث كبلر عن نظام رياضي وهندسي في أفلاك الكواكب وبالمعتقد الفيثاغوري القديم في

التناغم العددي. هكذا يقر سمرفيلد، متيحًا الفرصة لومضة نادرة من النثر البليغ، "إن ما نستمع إليه هذه الأيام بلغة المطياف هو موسيقى ذرية أصيلة تعزفها الأجسام الكروية، سيمفونية متناسبة بشكل ثري، نظام وتناغم ينبثقان عن التنوع".

فهم سمرفيلد أن البحث عن التواترات العددية سبيل لوضع أساس نظرية أعمق، تمامًا كما أن قوانين كبلر في حركة الكواكب، المشتقة من تدقيق محكم في حركة الكواكب المرئية، لم تكتسب معناها الحقيقي إلا بعد أن منح قانون نيوتن في المربع العكسي للجاذبية الأساس النظري لوقائع المجموعة الشمسية. غير أن استراتيجية سمرفيلد، من منظور بولي ذي العقلية التحليلية الصارمة، لم تكن سوى توليفة شاذة بين المحافظية النظرية والصوفية المحدثة. الأفضل، فيما أفكر بولي، هو أن نحاول تأسيس النظريات العقلانية وفق مبادئ صحيحة ـ رغم أن محاولته العثور على مثل هذه النظرية للهيدروجين الجزيئي المؤيّن لم تذهب به بعيدًا. لم يكن السبيل للمضي قدمًا واضحًا لأحد.

ولأنه استمرأ في ميونخ عادة استمرت معه طيلة حياته، تعينت في المكوث حتى وقت متأخر من الليل في المقاهي والحانات، فإنه كان بوجه عام يغيب عن محاضرات الصباح. كانت لدى سمرفيلد رؤى صارمة في السلوك المناسب، وكان يصر على نهوض بولي في ساعة مبكرة حين يكون دماغه ما زال مفعمًا بالنشاط. بذل بولي جهدًا في الامتثال. ولأن العادة لم تتمكن من نفسه، ما لبث حتى عاد إلى ساعاته المفضلة. ولأنه كان قصيرًا وبدينًا، دأب على هز كرسيه إلى الأمام وإلى الوراء حين كان يجلس عليه ويتأمل. استنتج سمرفيلد أنه ليس في وسعه أن يجعل طالبه الذكي يسلك على النحو الذي اعتبره سويًّا، فرضي بساعاته المتأخرة وسبله غريبة الأطوار. كان بولي يصف سمرفيلد في غيابه بعقيد الهوصار [ضابط في إحدى الوحدات العسكرية الأوربية المنظمة على طريقة سلاح الفرسان الهنغاري الخفيف في القرن الخامس عشر]، غير أنه كان يظهر دائمًا في حضوره اهتمامًا واحترامًا لم يكن لأي شخص آخر، حتى أينشتين.

كان سمرفيلد بروسي المولد، وكان مظهره يوحي بذلك. كان قصيرًا، ممتلئ الجسم، وذا لياقة صحية، كما كان حسن الملبس ذا شاربين لامعين رائعين ومظهرًا عسكريًا. بعد بلوغه الأربعين بسنين انضم تواقا إلى الخدمة العسكرية ضابط احتياط. كان رجلاً رياضيًا يحسن التزلج، وفي شبابه كان يسعد بالمشاركة في حفلات الشرب والمبارزة التي ازدهرت في الجمعيات الطلابية.

غير أن مظهر سمرفيلد المحافظ كان خادعًا. سطوته على الفيزياء الكلاسيكية لم تحل دون ممارسة قدراته الابتكارية. لقد ركز بجدية مفرطة على نموذج بور في الذرة المؤسس بطريقة سيئة وإن ظل رائعًا، وقد وظف معرفته المكثفة والمفصلة في تحويل ذرة بور البسيطة إلى أداة نظرية متطورة.

أيضًا لم تكن شخصيته تعكس المظهر البروسي الذي بدا عليه. كان مع طلابه ودودًا وحميميًا. وفضلاً عن محاضراته العادية، كان يعقد كل أسبوع حلقة نقاش تمتد ساعتين يطرح فيها أحدث مواضيع البحث. "كان شبيهًا بسوق لتبادل الآراء حول أحدث التطورات"، حسب وصف هايزنبرج لتلك النقاشات الحرة. هكذا تعلم طلاب سمرفيلد وانتقدوا بشكل مباشر نظرية الكم في الذرة التي كانت تمر بطور تغير مستمر. لقد أقحمهم بوصفهم مساهمين في عمله Atomic Structure and Spectral Lines الذي كان يقوم بتنقيحه وتحديثه باستمرار. لم يتخرج في مدرسة ميونخ للفيزياء النظرية بولي وهايزنبرج فحسب؛ بل عدد لافت من المساهمين الآخرين في نظرية الكم الوليدة.

في فترة ما من عام 1920 عرض سمرفيلد في حلقة النقاش البحثية الأسبوعية آخر مبتكراته، عدد كمومي رابع. حتى ذلك الحين، كانت الإلكترونات في ذرة بور – سمرفيلد توصف من قبل ثلاثة أعداد كمومية تحوز دلالة هندسية مباشرة عبر حجم وبيضاوية واتجاه الأفلاك. غير أن سمرفيلد اتخذ هنا خطوة حاسمة بعيدًا عن هذه الصورة السائدة.

تم اشتقاق العدد الكمومي الرابع من تدقيق سمرفيلد في ما يعرف بتأثيرات زيمان الشذوذية التي تعرضها ذرات متعددة الإلكترونات بعينها. (هذه تنويعة أكثر تركيبًا من تأثيرات زيمان الأصلية، الفصل بين الخطوط المطيافية في مجال مغناطيسي). وكعادته، بملاحظة تواترات عددية بعينها في البيانات المطيافية، استحدث سمرفيلد عددًا كموميًا رابعًا بدا أنه يفسر النمط. غير أنه لم يكن هناك لهذا العدد الرابع أساس نظري؛ إذ لم يأت صحبة أي تأويل واضح عبر هندسة أو ميكانيكا الأفلاك الإلكترونية. مجهدًا نفسه بالبحث عن تبرير، جادل سمرفيلد عن أنه يوجد في هذه الذرات إلكترون مفرد بعيد عن الجزء المركزي يسهم في التحولات المعنية، في حين تظل النواة وسائر الإلكترونات الداخلية الباقية تشكل لبًا مركبًا وثابتًا. هكذا بدا الشيء بأسره نوعًا معدلاً من الهيدروجين، وقد اقترح سمرفيلد أن العدد الكمومي الرابع يتضمن ما أسماه بشكل غامض "الدوران الخفي" الذي يقوم به إلكترون مفرد قصي عن مركز الذرة.

لم يكن هذا عند بولي نظرية بل خيالاً. أن تأخذ خصائص قياسية تختص بها الأفلاك الإلكترونية وتحولها إلى أعداد كمومية شيء، وأن تستحدث عددًا كموميًا من مجمل النسيج ثم تزينه بعد ذلك بتأويل آدهوكي [معد خصيصًا لتجنب الحالات الشذوذية] ومشكوك في أمره شيء آخر. هل استلزم ابتكار سمرفيلد الجديد أن الذرة الكمومية تتسم بخصائص لا سبيل لفهمها بالرجوع إلى ميكانيكا الأسلوب القديم؟ أم أن هذا الابتكار لا يعني سوى أن نظرية الكم حادت عن السبيل؟

لعل بولي اقترح آنذاك على هايزنبرج وبشكل ساخر أنه "أسهل بكثير أن يجد المرء طريقه لو لم يكن ألوفًا أكثر مما يجب لوحدة الفيزياء الكلاسيكية العظيمة. لقد حزت في هذا الشأن أفضلية واضحة"، فيما أخبر أحد زملائه من الطلاب بابتسامة خبيثة، "غير أن عوز المعرفة لا يضمن النجاح".

إذا كان بولي وصل إلى ميونخ بعد أن كاد يكون عالم فيزياء ناضجًا ومشكلاً تمامًا، مسلحًا ليس فقط بمعرفة معمقة بل أيضًا بآراء أعلن عنها، فقد كان هايزنبرج في المقابل

موهوبًا لكنه حالم، ذا سطوة متفاوتة على موضوعه. حسب هايزنبرج في البداية أنه سوف يواصل دراسة الرياضيات البحتة، غير أنه عثر في صباه على كتاب صغير ألفه أينشتين في محاولة لتفسير النسبية لغير العلماء. وكما قال لاحقًا، "كانت رغبتي في البداية دراسة الرياضيات"، فيما يتذكر لاحقًا، "قد تحولت دون وعي شطر الفيزياء النظرية".

ولد فرنر هايزنبرج في نهاية عام 1901 في مدينة فورزبرج الجامعية، التي كانت تبعد 150 ميلاً شمال غرب ميونخ؛ حيث كان والده يدرّس الكلاسيكيات. كان أوجست هايزنبرج [August Heisenberg] قد نذر نفسه لألمانيا البسماركية، الأمة البروتستنتية الموحدة في تجارتها وسلوكها الأخلاقي. عاشت أسرته حياة لائقة. كانت تذهب إلى الكنيسة بشكل منتظم امتثالاً فحسب للواجب، وقد اعترف أوجست فيما بعد لابنيه بأنه لم يكن يستشعر أية حساسية دينية بعينها. في نهاية حياته، قال فرنر، بغموض أنيق يناسب مستحدث مبدأ الريبة، "إذا قال شخص ما إنني لم أكن مسيحيًا، فقد أخطأ. ولكن إذا قال إنني كنت مسيحيًا، فقد أسرف في قوله".

في عام 1910، عيّن أوجست هايزنبرج أستاذًا في فقه اللغة البيزنطية في جامعة ميونخ، فانتقلت الأسرة إلى العاصمة البافارية. كان الأستاذ هايزنبرج مدرسًا جيدًا، لكنه كان صارمًا أكثر مما يجب. الأسلوب الرسمي في التعامل، حين يقع في شرك الصرامة، إنما يورث مزاجًا متقلبًا يفصح أحيانًا عن نفسه، عادة ضمن خصوصية العائلة. لقد كان يحض فرنر وأخاه الأكبر إرفين [Erwin] على أن ينافس الواحد منهما الآخر، في الرياضية البدنية وفي التمسك بالتعاليم التقليدية، وقد كان إرفين في معظم الأحوال يحرز قصب السبق في الرياضيات دون غيرها. بعد ذلك اكتشف فرنر أنه يستطيع هزيمة إرفين، وقد كان هذا الاكتشاف أساس حياته. لم يكن فرنر وإرفين إطلاقًا قريبين من بعضهما البعض. بعد دراسة الكيمياء، انتقل إرفين إلى برلين وانغمس في دراسة الحكمة الأنثروبولوجية. حين كانا في سن الرشد، لم تكن هناك اتصالات بين الأخوين إلا في حالات نادرة وعابرة.

بعد أن أكمل المدرسة الثانوية أثناء نهاية الحرب، كان على فرنر أن يؤدي الخدمة في الميليشيا المحلية، وهي مجموعة من الشباب من ذوي الملابس الرثة أوكل إليها أمر الحفاظ على النظام في مدينة مزقها النزاع. كان الأمر، فيما قال لاحقًا، أشبه بممارسة لعبة الشرطة واللصوص؛ إذ لا شيء ينجز بجدية. إنه يذكر أنه قد "تمر فترة طويلة لا تحصل فيها أسرنا على كسرة خبز"، وكان هو وأخوه الأكبر وأصدقاء آخرون يذرعون شوارع ميونخ الممزقة بحثًا عن الطعام. في فترة السوفيت البافاريين، تسلل عبر خطوط النار إلى منطقة تحكمها قوات الجمهورية الألمانية، وعاد محملاً بالخبز والزبد ولحم الخنزير المقدد. كان هايزنبرج يسرد هذه الذكريات على أنها وقائع عادية، كما لو أن هذه المغامرات مادة مراهقة سوية تمامًا.

كان طفلاً خجولاً وحذرًا. خلال الحرب، بدأت شخصيته في التشكل. مثقلاً في شبابه بالمسؤوليات في الميليشيا المحلية، اكتشف فرنر في نفسه شخصية كارزمية، قدرة على القيادة وفرض الاحترام، إن لم يكن فرض الحب. وبعيدًا عن أسرته المتزمتة، وجد براحًا للتنفس ضمن منظمات متحررة ينتمي إليها شباب سافروا عبر الجبال والطرق الريفية سيرًا على الأقدام، وخاضوا في نقاشات شبابية في النقد والعلم والموسيقى والفلسفة. ترجع مثل هذه الجماعات إلى عقدين من الزمان وقد كانت تنتمي إلى جمعيات أكبر تسمى بأسماء من قبيل Pfadfider [مكتشف الطريق] و Wandervogel [الطير المهاجر]. تشكلت الجماعات الألمانية تأسيًا بالحركة الكشفية التي بدأت مؤخرًا في بريطانيا العظمى على يد بادن – باول، ولذا نحت إلى أن تكون أكثر رومانسية في روحها من نظيرتها البريطانية الحماسية والعملية. بعد الحرب بوجه خاص أصبحت مخزونًا لكل أنواع التفكر التمنوي والتواق إلى مجتمع سلمي جديد. وعلى حد تعبير هايزنبرج، "الشرنقة التي يحمي فيها المنزل والأسرة الشباب في فترات أكثر سلمية انفجرت مفتوحة في فوضى ذلك العهد، ... وكتعويض اكتشفنا معنى جديدًا للحرية".

كانت الحركة الشبابية في صميمها حركة مراهقة وطبق – وسطية، وهذه نعمة لم تكن تتاح إلا للمحظوظين. وعلى نحو مشابه يصف تومس مان [Thomas

Mann]، في Doctor Faustus [دكتور فاوست] رحلات إلى الريف قام بها طلاب شباب، وقد علق بذكاء بقوله "إن لهذا الأسلوب الحياتي المؤقت، حين يصبح المقيم في المدينة الذي يخوض في مشاريع فكرية ضيفًا عابرًا على موقع قروي بدائي من أمنا الطبيعة ...، متكلفة، مدللة، غير احترافية، أثرًا من الكوميدي".

في بعض من هذه المنظمات الشبابية بذور سوف تنمو لتثمر بعد ما يقرب من عقد منظمة Hitler Youth [شباب هتلر] بنغمتها الحادة والعنيفة. غير أن جماعة هايزنبرج كانت بمنأى عن السياسة، وقد أمّن له تجواله (كانت هناك رحلات وصلت إلى النمسا وفنلندا) سلوانا تعلّق به حتى بعد ازدهار سيرته العلمية. لقد رغب هايزنبرج طيلة حياته في أن يعتقد أنه يستطيع التعامل مع استحقاقات النضال السياسي بالنظر في الاتجاه الآخر والتراجع صوب الطبيعة.

في عام 1920 نسّق أب هايزنبرج لفرنر مقابلة مع فرديناند لندمان [Ferdinand Linemann]، وهو أستاذ رياضيات ذي مرتبة أكاديمية رفيعة في ميونخ. قبل سنين كان لندمان قد عارض توظيف سمرفيلد بحسبان أن عالم الرياضيات التطبيقية المنشغل بالفيزياء كهواية ليس سوى مخلوق بائس. كان يشغل مكتبًا مظلمًا مكدسًا بأثاث من طراز عتيق. وعلى المكتب، جلس كلب أسود صغير، يحملق في الشاب المبتهل ثم يرفع عقيرته بالنباح. بدأ لندمان في تقصي اهتمامات هايزنبرج والتعرف عليه. في خضم هذه الجلبة، تسنى لهايزنبرج أن يعترف بأنه كان يقرأ عن النسبية. آنذاك أنهى لندمان المقابلة قائلاً: "في هذه الحالة، فقد ضعت كلية في الرياضيات".

فما كان من هايزنبرج إلا أن قرر الذهاب لرؤية سمرفيلد؛ حيث حظي باستقبال دافئ، وإن ظل نقديًا. أعجب سمرفيلد بسطوة هايزنبرج على الرياضيات وباهتمامه بالفيزياء الحديثة، غير أنه أزعجه أن المرشح فيما يبدو أكثر اهتمامًا بالأسئلة الفلسفية منه بالأساسيات العلمية للتجربة والنظرية، التي ظهر أن هايزنبرج لم يجدها مهيبة على نحو كاف. يتوجب عليك أن تمشي قبل أن تشرع في الجري؛ هذا مفاد نصيحة سمرفيلد: إذا رغبت في تناول الأسئلة الأكثر عمقًا، يلزمك أولاً أن تسيطر على

الموضوع. خرج هايزنبرج من المقابلة معتقدًا أن الفيزياء قد تكون مملة بعض الشيء. تجادل مع أصدقائه في الحركة الشبابية حول القضايا الكبيرة: ما المعرفة؟ كيف لنا أن نثق فيها؟ ما الذي يشكل تقدمًا؟ فيما أراد منه سمرفيلد أن يتقصى البنية الدقيقة للخطوط المطيافية في الهيدروجين وتأثيرات زيمان الشذوذية في المعادن القلوية. على ذلك، سجل هايزنبرج مع سمرفيلد لدراسة الفيزياء.

للإيفاء باستحقاقات أطروحته، اضطلع بمشكلة آمنة في مجال فيزياء تدفق الموائع الكلاسيكية. غير أن هذا لم يكن سوى عرض جانبي مقارنة بانغماسه السريع في نظرية الكم. لم يكن هايزنبرج عليمًا بالفيزياء مثل بولي، ولعل هذا ما جعله أوسع تفكيرًا، وأقل نزوعًا لرؤية الصعوبات منه لرؤية إمكانات الاقتراحات الغريبة طالما بدت واعدة.

أخبر بولي هايزنبرج أنه ما أن يحسن الرياضيات حتى يحصل على كل ما يريد؛ سوف تتسنى له إثارة المشاكل وحساب الحلول. غير أن هايزنبرج أراد شيئًا أبعد من ذلك، فهما أكثر أساسية أو عمقًا. بخصوص ذرة الكم التي كانا يحاولان توضيحها، أخبر بولي "لقد فهمت النظرية بدماغي، لكني لم أفهمها بعد بقلبي". وعلى حد تعبيره، كانت ذرة بور – سمرفيلد آنذاك "مزيجًا غريبًا من النشاط المعقد غير المفهوم والنجاح الإمبيريقي".

غير أن هذا النشاط يشكل في الواقع الجزء الأكثر إثارة في موضوع الفيزياء. عرض سمرفيلد على هايزنبرج العدد الكمومي الرابع الذي استحدثه مؤخرًا، وسأل طالبه الجديد ما إذا كان بمقدوره توسيع المخطط بحيث يشمل المزيد من غرائب تأثيرات زيمان الشذوذية. ولأنه كان بارعًا متعدد المصادر، ذا مهارات تقنية وخيال علمي، استجاب لطلب أستاذه ـ وخلص إلى نتيجة أدهشت كليهما. في محاولته تفسير تنويعة أكبر من الخطوط المطيافية، استحدث هايزنبرج معادلة بارعة نجحت بشكل جيد، طالما أعطى العدد الكمومي الرابع الغامض أصلاً قيمًا نصفية: 1/2، 3/2، 5/2،

وهكذا. (لا فائدة من الضرب في 2 للتخلص من الكسور، لأن هذا ينتج السلسلة 1، 3، 5، .. التي لا تشمل الأعداد الزوجية).

لم يكن سمرفيلد مهيأ لهذا التأمل. نصف الكم يتعارض مع بيت قصيد مشروعه. وافق بولي: ما أن تسمح بالأنصاف، حتى تفتح الباب للأرباع والأثمان، وعما قليل لن يبقى شيء من نظرية الكم.

وفي حين كان هايزنبرج وسمرفيلد يناضلان مع هذا المقترح الغريب، نكصا شطر رؤية الفكرة نفسها التي نشرها شاب ألماني آخر، آلفرد لاندي. كان لاندي قد علم أول مرة بنظرية الكم حين كان طالبًا في جوتنجن، إبان زيارة نيلز بور التي سبقت الحرب. مثل هايزنبرج، لم يكن لدى لاندي أي تبرير لحيلة نصف الكم، باستثناء كونها قادرة فيما يبدو على تفسير لغزين مثيرين.

أسفًا على فقده الأسبقية، حاول هايزنبرج استعادة الريادة بمحاولة تأمين نظرية في نصف الكم. كان سمرفيلد قد اقترح أن العدد الرابع يتعلق بدوران إلكترون خارجي نسبة إلى مركز الذرة. غامر هايزنبرج بالذهاب إلى أبعد من ذلك، فاقترح أنه بالمقدور تقسيم هذا الدوران بطريقة ما إلى نصفي وحدات، جزء ينتمي إلى الإلكترون، والآخر إلى الجزء المركزي. حين يقوم الإلكترون الخارجي بتحول، فإن نصف كم الدوران وحده الذي يقوم بهذا الدور.

انتشى هايزنبرج ببراعته، لكن سمرفيلد وبولي لم يتحمسا لفكرته. صحيح أنها كانت مغامرة وخيالية ـ أو بتعبير آخر، تأملية ولا أساس لها. على ذلك، وافق سمرفيلد على إرسال هذا البحث إلى مجلة علمية، فكانت أول أعمال هايزنبرج المنشورة. لم يحفل لاندي هو الآخر بالفكرة، وقد كتب إلى هايزنبرج مشيرًا إلى أن نظريته تتغاضى عن مبدأ الحفاظ على كمية التحرك الزاوي، الذي يعتبره مبدأ مقدسًا. غير أن هايزنبرج لم يأبه كثيرًا بذلك. لقد كانت كل القواعد القديمة موضع شك عنده. وكما قال لاندي بعد ذلك بسنوات عديدة، لم يكن دأب هايزنبرج حين يصادف مشكلة صعبة المثابرة في البحث عن حل ضمن حدود الفيزياء المعروفة بل البحث مباشرة عن

شيء جديد كلية، شيء متطرف. من شأن هذا الموقف أن يحقق نجاحًا عظيمًا لهذا الشاب، غير أنه قد يعود عليه بالضرر.

وعلى نحو مماثل، حكم سمرفيلد على هايزنبرج بأنه ذكي حقيقة، لكنه مختال بشكل خطر. إنه، باختصار، غير ناضج. أفكر في عمل تلميذه الصغير حدًا جعله يكتب عنه لأينشتين، مثنيًا على النظرية التي حاول هايزنبرج تشكيلها، لكنه قبل بعض التحفظات عليها. "إنها تعمل بنجاح، غير أن أساسها غير واضح تمامًا"، أو هكذا قال. "بمقدوري أن أستمر فحسب مع تقنيات الكموم؛ لكن عبء تأمين نظرية فلسفية إنما يقع عليك".

وسواء كانت محاولة هايزنبرج الأولى في الفيزياء النظرية رائعة أو حمقاء، أو كليهما، فقد غيرت من موقفه السابق. لقد أصبح الآن يرى أن التقدم لا ينجم عن التأمل العميق في القضايا الفلسفية المهمة بل عن محاولة حل مشاكل بعينها. غير أنه من المفيد أن يجعل المرء عقله مفتوحًا لتفكر جديد. لقد كانت سخرية بولي محقة بعض الشيء. لم يكن هايزنبرج يعرف من الفيزياء ما يكفي لرؤية إلى أي حد تعد نظريته في نصف الكم منافية للعقل. ولكن سمرفيلد، فيما سبق لهايزنبرج أن توقع، كان يميل إلى الإفراط في الحذر، كما كان بولي مشككًا أكثر مما يجب. بعد عدة سنوات، قابل هايزنبرج عالم الفيزياء الأمريكي رتشارد فينمان [Richard Feynman]، الذي كان يأسى على حقيقة أنه لم يعد يسمح لعلماء الفيزياء الشبان برفاهة ارتكاب الأخطاء، فأساتذتهم وزملاؤهم يسرعون إلى تعنيف أي استدلال معتل قبل أن يعطي فرصة للازدهار. وكما أخبر هايزنبرج، يحدث أن تكون لديه فكرة لا معنى منطقيًا لديها، ولكن "اللعنة! أستطيع أن أرى أنها صحيحة".

تحت إشراف سمرفيلد، مرّ هايزنبرج بتجربة قيّمة بشكل معمق: رؤية أول أفكاره في الفيزياء، الملهمة والخلافية، تعرض على الملأ وتترك للدفاع عن نفسها. لقد كان

الأمر مبهجًا حقًا. لم يحث النقد هايزنبرج إلا على المثابرة. لقد وجد طريقه. كان النظام القديم يتفسخ، وسوف ينضم هايزنبرج إلى البحث عن نظام جديد. في الفيزياء، كما في السياسة، ليس لدى الشباب حنين إلى اليقينيات القديمة.

الفصل السابع

أنى للمرء أن يكون سعيدًا؟

استمتعت ألمانيا في صيف عام 1922 بهدوء مؤقت. كان الطعام نادرًا، غير أن نزر الذين تضوروا جوعًا كان قليلاً. كان المال شحيحًا، غير أن التضخم المفرط الذي أرغم الناس على التجول بما قيمته بلايين الماركات من الأوراق النقدية التي لا قيمة لها في عجلات اليد لشراء الخبز والحليب، ظل مقدورًا عليه. في جوتنجن، كان الطقس رائعًا، وهناك تجمع المنظّرون في شهر يونيو للاستماع إلى سلسلة من المحاضرات في نظرية الكم من المرشد والأستاذ المعترف به في هذا الحقل، نيلز بور. كان من الطبيعي أن يحضر سمرفيلد، وقد أصر على أن يصطحب معه تلميذه الخلافي ومبكر النبوغ هايزنبرج. حتى في أسرة هايزنبرج الثرية نسبيًا لم يكن هناك ما يكفي من المال للترحال، ولذا تكفل سمرفيلد شخصيًا بتكاليف رحلة فرنر. نام هايزنبرج على أريكة مسافر آخر وكان جائعًا باستمرار. غير أن هذا، فيما يذكر، متوقع من الطلبة في تلك الآونة.

كان بولي هناك أيضًا. بعد أن حصل على درجة الدكتوراه في ميونخ في الخريف السابق، أمضى فصل الشتاء الدراسي في جوتنجن، ثم انتقل إلى هامبورج بعد أن عيّن هناك. أما الآن فإنه يرحل صوب الجنوب لمقابلة بور أول مرة.

كانت زيارة بور مهمة سياسيًا بقدر ما كانت مهمة علميًا. مثل أينشتين، نفر بور من العسكرتارية والإمبريالية الألمانية، لكنه لم يوافق على محاولة عزل العلم الألماني بعد الحرب عن بقية العالم. ليس بمقدور الإصرار على الانتقام أن يورث السلام.

كان سبق لبور أن أعاد تأسيس ارتباطاته في ألمانيا. لقد زار برلين عام 1920 بدعوة من بلانك وأينشتين. كان ذلك أول لقاء له مع هاتين الشخصيتين البارزتين، وكلاهما وجد هذا الشاب الدنمركي جديرًا بالإعجاب. بعد ذلك تبادل أينشتين وبور رسائل الإعجاب. "لم يسبق غالبًا أن أبهجني شخص ما بمجرد حضوره"، كتب أينشتين لبور. "إنني أدرس الآن أبحاثك العظيمة ـ وإذا حدث أن وقعت في مأزق ما ـ كنت أسعد برؤية وجهك الفتي الودود أمامي، يبتسم ويفسر". "لقد كانت مقابلتك والتحدث معك من أعظم الخبرات التي مررت بها في حياتي"، رد بور، مضيفًا: "لن أنسى محادثتنا ونحن في طريقنا من دهلم إلى بيتك".

بعد عامين، حين زار بور جوتنجن، كان هناك قدر من المرونة يفت في صلابة الجامعة. كان رئيس قسم الفيزياء النظرية الجديد هو ماكس بورن، الذي كان منذ ثمانية أعوام، أثناء زيارة بور التي سبقت الحرب، واحدًا من العلماء الشبان المتحمسين الجالسين في نهاية القاعة. كان لدى بور شيء من غرام جوتنجن بالصرامة الرياضية، غير أنه تبنى الفيزياء الجديدة المدهشة رغم تخبطها وعوزها للاتساق.

في طقس يونيو الرائع من عام 1922، ألقى بور، بأسلوبه الاستطرادي الغامض، سلسلة من المحاضرات عرض فيها رؤيته في نظرية الكم القادمة من كوبنهاجن. لاحقًا تم تسمية هذا الأسبوع المتوهج Bohr Festspiele [ألعاب عيد بور]، على اسم فرقة هاندل فستسبيلي التي كانت تعزف في جوتنجن في الوقت نفسه تقريبًا.

كانت النوافذ مشرعة، فيما كانت ضوضاء الصيف تتسلل إلى قاعة النقاش الهادئة. شكا أحد الحاضرين المحليين من أعضاء هيئة التدريس الأرفع مكانة أكاديمية في جامعة جوتنجن، الذين احتلوا كعادتهم أفضل المقاعد في المقدمة، تاركين العلماء الصغار يتجمعون في الخلف؛ حيث كان يجهدون في التصنت لكلمات بور البطيئة والمبهمة. غير أن هايزنبرج كان منتشيًا. لقد تعلم فيزياء كمه من سمرفيلد، الذي أكد أسلوبه التقني نماذج بسيطة وحسابات أولية. أما عن الصوت السيد، في المقابل، فقد "كشفت كل جملة قالها عن سلسلة من الأفكار المؤسسة، والتأملات الفلسفية، التي

كان يلمح بها ولكن دون أن يعبر عنها بشكل كامل. كل ذلك كان يبدو مختلفًا على لسانه"، أو هكذا قال هايزنبرج.

تحدث بور عن بعض الأفكار الحديثة التي قام صحبة مساعده بتطويرها في كوبنهاجن. كان لدى هايزنبرج، الذي اطلع على الأبحاث وانتقدها مع بولي، ما يكفي من الجرأة للإفصاح من خلف القاعة عن اعتراضاته، ما جعل السادة الجالسين في الأمام يدورون برؤوسهم نحوه. كان بور يعرف هايزنبرج بالاسم، من أعماله في فكرة نصف الكم المستهجنة، وبعد أن انتهت المحاضرة استضاف هذا الشاب الصغير إلى محادثة طويلة. صعدا إلى هينبرج، التلة الصغيرة التي كانت تشرف على جوتنجن، وجلسا في مقهى يحللان نظرية الكم. بعد سنوات قال هايزنبرج "إن سيرتي العلمية لم تبدأ إلا حينذاك".

أفصح هايزنبرج لبور عن رغبته في معرفة ما تعنيه نظرية الكم. لقد أراد أن يعرف، خلف الحسابات البارعة ومطابقة الخطوط المطيافية المركبة مع أنساق غريبة من الأعداد والقواعد الكمومية، ماهية المفهوم المؤسس، الفيزياء الصحيحة لكل ذلك. لم يصر بور على الحاجة إلى نماذج كلاسيكية مفصلة يمكن ترجمتها بشكل منتظم إلى مصطلحات كمومية؛ إذ مفاد النماذج، فيما أخبر هايزنبرج، أسر القدر الأكبر مما يأمل المرء في قوله عن الذرات، في ضوء عدم مناسبة الأفكار التي كان علماء الفيزياء يتحسسون بها الطريق. "حين يتعلق الأمر بالذرات"، اختتم بور حديثه بشكل ملغز قائلاً، "لا سبيل لاستخدام اللغة إلا على طريقة الشعر. الشاعر بدوره ليس معنيًا بوصف الحقائق قدر عنايته بخلق صور وتكريس ارتباطات ذهنية".

كان هذا عند هايزنبرج غريبًا وموحيًا. قبل جيل واحد فقط، جادل بولزمان وحلفاؤه بقوة عن الذرة بوصفها شيئًا عينيًا، وليس تجريدًا نظريًا، ناهيك عن أن تكون وهمًا شعريًا. هل يقول بور الآن أنه ليس في وسع علماء الفيزياء أن يأملوا في وصف الذرات عينيًا، وأن عليهم أن يرضوا بالمماثلات والاستعارات؟ أن حقيقة

الذرة الجوهرية ليست متاحة لهم؟ أنه قد لا يكون هناك معنى للحديث عن الواقع الجوهري للذرة؟

لا يستبان إلى أي حد يمكن للقارئ أن يثق في تصور هايزنبرج لهذه اللقاءات وغيرها. حين كتب عنها بعد العديد من السنوات، تظاهر بإعادة تشكيل محادثات مطولة ومكثفة، عرضها في فقرات مركبة ومعمقة. يصعب التشكيك في أن بور، وفق تذكر هايزنبرج، قد قال أشياء تناسب آراء بور في الفيزياء وتم تعديلها من قبل هايزنبرج خلال السنوات العديدة الفاصلة. ما لا ريب فيه هو أن أول لقاء لهايزنبرج مع بور قد غيّر حقيقة من رؤيته في مغزى نظرية الكم.

رغم أن بور فهم أن نظرية الكم قد لا تمتثل للقواعد الكلاسيكية، فإنه أكد منذ البداية أنه لا غنى عن لغة الفيزياء الكلاسيكية ـ التي تصف بنجاح تام عالم الحياة اليومية. لقد تعين الجسر الذي شيد عبر هذه الفجوة في فكرة شاملة أسماها مبدأ التوافق: يتوجب على نظرية الكم في الذرة أن تتطابق دون تفاوت مع التحليلات الكلاسيكية للسلوك الذري، أنى ما استبان نجاح هذه التحليلات. مثال ذلك، تقفز الإلكترونات بين أفلاك متدنية، قريبة من النواة، وتحدث فيها تغيرات كبيرة ومفاجئة في الطاقة، في حين أنه في حال الانتقال بين الأوضاع ذات الأعداد الكمومية الكبيرة ـ الأفلاك البعيدة في نطاق النسق الذري الواسع ـ يكون التغير في الطاقة صغيرًا نسبة إلى طاقة الأفلاك نفسها. وكلما كانت القفزة الكمومية أصغر، كانت أشبه بنوع التغير المضاف والقابل للتناول الكلاسيكي. إن مبدأ التوافق يعني أنه يتعين في هذه الحالات أن ينزع السلوك الكمومي والكلاسيكي شطر الناتج نفسه. الراهن أن بور استخدم استدلالاً من هذا النوع في عرض تفاصيل نموذجه الذري.

بيد أن تطبيق مبدأ التوافق بشكل ناجح على مواقف مركبة يتطلب بوجه عام إتقانًا بعينه من جانب الممارس. ثمة كتاب تدريسي نشر في العشرينيات يقر أن مبدأ التوافق "غير قابل لأن يعبر عنه في قوانين كمية دقيقة، [غير أنه] أصبح على يد بور مفيدًا بشكل استثنائي". إبراهام بيز [Abraham Pais]، الذي كتب بشكل مكثف

عن هذه الفترة من تاريخ علم الفيزياء، يعلق بشكل مبهم بقوله "إن الاستخدام العملي لمبدأ التوافق يتطلب لقانة فنية". أما إميليو سيجري [Emilio Segre]، وهو عالم فيزيائي آخر يذكرنا بالأيام الخوالي، فيوافق على صعوبة صياغة مبدأ التوافق بشكل دقيق، وهو يشرح ذلك بقوله إنه يعني عمليًا "أنه كان لبور أن يسلك على هذا النحو".

هكذا يظهر الغموض البوري. بأسلوبه المنتظم والبدهي عرف بور كيف يقوم بتشييد نظرية الكم، وكان يفترض على علماء الفيزياء أن يحذوا حذوه، حتى إن لم يفهموا ما كان يقوم به. لقد اشتهر بور بأنه كان يحاضر ببطء، ويتكلم بشكل غير مترابط، ويجهد في صياغة جمل مشحونة في الظاهر بمعاني عظيمة تتجاوز قدرة المتلقي. بطريقة ما كانت مسؤولية تقصي ما يريد تقع على المتلقي، عوضًا عن تحمل بور عبء التحدث بشكل أوضح. مثل أي معلم روحي جدير بهذا اللقب، كان بور يتكلم بأسلوب مبهم وغير مباشر.

يستبان من مراسلات هايزنبرج لوالديه في الوطن بعد أول مقابلة له مع بور أن هايزنبرج أثار إعجابه. ورغم أن بور، فضلاً عن سمرفيلد، قد عبر عن تحفظات شديدة حول فكرة نصف الكم، لزم كل منه أن يسلّم، حسب هايزنبرج، بأنه لم يكن في وسعه إثبات أنه مخطئ، وأن اعتراضاته اختزلت في النهاية إلى "عموميات ومسائل ذوقية". ثم أن بور وصف عمل هايزنبرج في إحدى محاضراته بأنه "مثير جدا"، وهذه عبارة فهمها هذا الشاب، الذي لم يكن يألف عبارات بور، على أنها تعبير عن موافقته على أعماله. في نهاية الأمر، أشار بور إلى هايزنبرج بأن عليه أن يجد سبيلاً لإمضاء بعض الوقت في كوبنهاجن.

هكذا وجد بور حواريًا جديدًا.

فيما ينبئ بنضج متسارع في المشهد الأمريكي، استضيف سمرفيلد في العام الجامعي الذي بدأ في سبتمبر عام 1922 للإقامة في ماديسون، بولاية ويسكانسن

القصية. سعد سمرفيلد بنشر بشارته الكمومية في وسط جمهور تواق جديد، كما أن فرصة الحصول على دخل أجنبي، بعد أن أصبح المارك الألماني أقل قيمة، كانت جديرة بأن تغتنم. أثناء غيابة، دبّر لهايزنبرج، الذي لم يكن تخرج بعد، مواصلة دراساته مع بورن في جوتنجن.

في الأثناء، في سبتمبر من ذلك العام، ذهب هايزنبرج لحضور اللقاء السنوي لجمعية العلماء والأطباء الألمان في ليبزج؛ حيث أمّل بوجه خاص في مقابلة أينشتين. غير أن النزعة ضد – السامية والحملة ضد العلم اليهودي كانت قد اشتدت. في يونيو، بعيد محاضرات بور الظافرة في جوتنجن، اغتال مقاتلو الجناح اليميني في برلين وزير الخارجية الألماني وولتر راثنو [Walther Rathenau]، وهو يهودي صديق لأينشتين. قام العمال والاتحادات التجارية والاشتراكيون بتنظيم أنفسهم والتظاهر احتجاجًا. الجماعات اليمينية بدورها شددت من حملتها ضد الشيوعيين واليهود. وفي هذا المناخ الخطر شديد الحساسية، فضل أينشتين ألا يذهب إلى ليبزج.

كانت زيارة هايزنبرج مفيدة في تفتيح رؤاه. في الجلسة الأولى التي حضرها، وقعت قصاصة صغيرة في يده، اتضح أنها منشور من حركة العلم الألماني يشجب تأثير الفكر اليهودي الملوث. اعترف هايزنبرج في مذكراته بأنه صدم من هذا التدخل السافر والمجحف للسياسة في الأوساط العلمية المحكمة. بيد أنه ما كان له أن يغفل عن هذا الكره الباطل. صحيح أنه كان له أن يأمل ألا يكون، أو أن يتظاهر بأنه ضلال عابر سوف ينهار تحت ضغوطات العقل. غير أنه لا شيء يحول دون أن يكون العلماء لا عقلانيين، انتهازيين وأنانيين، مثل دهماء الشوارع. باختصار، لم يكن العلم بالحصن المنيع الذي حلم به هايزنبرج.

بعد تلك الجلسة الأولى، عاد إلى نزله ليكتشف أن متاعه قد سرق، باستثناء ملابسه التي كان يرتدي وتذكرة عودته بالقطار. قفل راجعًا إلى ميونخ، وبعد ذلك بقليل سافر إلى جوتنجن. هناك تسنى له أن يجد ملاذًا في مدينة جامعية تفخر بعزلتها عن محن العالم الخارجي.

كان بولي أمضى فصل الشتاء الدراسي السابق في جوتنجن. كتب بورن إلى أينشتين يقول "إن بولي الصغير مثير جدًا؛ لن أحصل على مساعد مثله". غير أنه استاء كثيرًا حين اكتشف أنه يتوجب عليه أن يرسل خادمًا كي يوقظه في العاشرة والنصف من كل صباح، كما أن شخصية بولي المستقلة والجافة ولسانه الحاد لم تحببانه إلى بورن الهادئ والرسمي. شكك بولي في نوع الصرامة والحذلقة المبالغ فيه الذي أسماه Gottingen Gelhrsmakeit - إسكولائية [مدرسية] جوتنجن. بعد سنين قال بورن عن بولي "منذ البداية، افتتنت به ... لم يكن يقوم بما أخبره بالقيام به - بل كان يقوم بما يقوم به بطريقته الخاصة؛ وقد كان بوجه عام محقًا".

رغم أنه كان لبورن، حين شرع سمرفيلد في الانسحاب من الخطوط الأمامية، أن يشرف على مدرسة في نظرية الكم لا تقل تأثيرًا في جوتنجن، لم يحظ إطلاقًا بالاحترام الذي ألهمه سرمفيلد. في صغره كان خجولاً وحساسًا، يسهل إحباطه بأقل أنواع الاستخفاف أو التجاهل، وحين كبر أصبح متحفظًا، هيابًا، وفي بعض الأحيان نكدًا. رغبته الأصلية في أن يكون عالم رياضيات أرهبتها المواهب الرياضية المحيطة. وما أن انتقل إلى الفيزياء، حتى استبين أنه ماهر، ومتنوع - هاو على حد وصفه لنفسه - لكنه ظل دومًا غير واثق من قدراته، يستعديه ألا يحتفي الآخرون بإسهاماته. إبان سنوات الحرب، عين أستاذًا في برلين؛ حيث أصبح قريبًا من أينشتين في الوقت الذي بدأت شهرة النظرية النسبية تجوب الآفاق. لاحقًا، قال بورن "لقد أعجبت بعظمة مفهومه حدًا جعلني أقرر ألا أعمل أبدا في هذا الحقل".

أصبح مدرسًا ومشرفًا جيدًا، فيما تبين خبرته مع بولي، غير أنه كان قابلاً لأن يروع من قبل طلاب أذكى منه وأكثر ثقة في أنفسهم. وخلافًا لبولي، أثبت هايزنبرج أنه قادر على أن يصحو مبكرًا دون عون من أحد، كما أنه كان يبدي الاحترام المناسب للآخرين. كان فيما يذكر بورن "مختلفًا تمامًا؛ لقد كان قرويًا صغيرًا حين جاء، هادئًا وودودًا وخجولاً ... غير أني سرعان ما اكتشفت أنه لا يقل ذكاء عن الآخر".

تعلم هايزنبرج من بورن ميولاً ثالثًا نحو تطوير نظرية الكم. لقد أحرز سمرفيلد تقدمًا عبر حل المشاكل، و لم يكن يحفل كثيرًا بالأناقة الرياضية أو العمق الفلسفي. حاول بور إقحام مفاهيم غامضة واقتراحات مبهمة في شكل عقلاني، و لم يكن يبدأ في الصياغة الرياضية إلا بعد ذلك. في المقابل، كان بورن يجد حرجًا في قول ما لا يستطيع التعبير عنه بطريقة رياضية صورية. ورغم أنه تخلى عن رغبته في أن يكون عالم رياضيات، احتفظ تفكيره بمسحة قوية من رغبة الرياضي في الاستدلال المحكم والمنطق المكين.

في جوتنجن، ظلت بقيت من الأصداء القديمة. ملاحظًا الاستخدام المتزايد للرياضيات المنقحة في النظرية الفيزيائية، أبدى ديفيد هلبرت [David Hilbert] العبقري الرياضي المبرز ملاحظة ليست مسلية تمامًا مؤداها أن الفيزياء قد أصبحت صعبة على الفيزيائيين ـ مضمّنا أن الرياضيين وحدهم القادرون على إنجاز المهمة بشكل مناسب. بورن نصف موافق على أقل تقدير. إنه لا يتفق مع بور في أهمية البدء بتحليل المفاهيم أولا: "لقد كنت أعتقد دومًا أن الرياضيات كانت أبرع منا ـ يتوجب على المرء أن يعثر أولاً على الصيغة الرياضية الصحيحة قبل التفلسف بخصوصها". في المقابل، كانت لدى هايزنبرج رؤية مختلفة بشكل مميز: "كان بورن محافظًا بطريقة ما، فهو لا يقر إلا ما يستطيع إثباته رياضيًا ... كما أنه لم يكن راضيًا تمامًا على الطريقة التي تسير بها الأمور في الفيزياء الذرية".

هكذا كان دور بور سيء الحظ: عند الفيزيائيين كان رياضيًا أكثر مما يجب؛ وعند الرياضيين لم يكن رياضيًا بما يكفي.

اكتسب هايزنبرج قدرًا أكبر من البراعة الرياضية بسبب الفترة التي أمضاها مع بورن، الذي كان يقود حلقة نقاش منتظمة في منزله مع نصف دستة من الطلاب المتحمسين. ولكن حتى في تلك الأيام، وبوصفه مجرد طالب جامعي يصدر أحكامًا على أستاذ مكرس، ظل أبعد ما يكون عن الاقتناع بأن لدى بورن الخيال المناسب لتطوير العلم.

تحت إشراف بورن، حاول هايزنبرج تطبيق آرائه، بما فيها نسق نصف الكم، على الهليوم المحايد- إلكترونان يدوران حول نواة ذات شحنتين. مطيافيًا، يعرض الهليوم كل أنواع التعقيدات، فلديه خطوط مفردة ومتعددة، وحين يكون في مجال كهربي أو مغناطيسي، تنقسم هذه الخطوط بطرق معقدة ومحبطة. كان هايزنبرج وبورن قد خلصا منذ زمن بعيد إلى أنه ليس بمقدورهما فهم الهليوم أبدا، حتى باستخدام إضافات وتحسينات ذرة بور – سمرفيلد التي كانت معروفة آنذاك. النتيجة نفسها انبثقت عن معهد بور.

في الأثناء قام آلفرد لاندي، بعد أن وجه إلى هايزنبرج فيما يتعلق بنصف الكم لكمات جعلته يفقد توازنه، بعرض تفصيل جديد أضاف فيه قواعد أخرى لإنتاج مخطط حاكى المزيد من غرائب تأثيرات زيمان. ولأنه كان يائسًا من هذه الاستراتيجية، لم يكن بمقدور بولي إنكار أن حيل لاندي وأدواته تبدو مناسبة لمجموعات معقدة ومتنوعة من البيانات المطيافية. غير أنه فيما يتعلق بالبحث عن نظرية مؤسسة، وجد جهوده عبثية.

بعد أن تولى منصبًا في هامبورج، أسرع بولي إلى طلب قضاء عدة شهور في كوبنهاجن؛ حيث يستطيع تعلم نظرية الكم من بور. في أحد الأيام، فيما يذكر بولي، كان يهيم على وجهه في الشوارع، فقابله صديق قال له إنه بدا كئيبًا. "أنى للمرء أن يكون سعيدًا حين يفكر في تأثيرات زيمان"، رد بولي وهو يكابد آلامه، ثم واصل طريقه.

رغم كل حماسه السابق لنماذج سمرفيلد المفصلة؛ أصبح بور الآن أكثر نفورًا من لعبة ميونخ، المطابقة غير المبررة لأعداد كمومية وأنساق عددية غريبة على كل أنواع الخطوط المطيافية. إن مثل هذه الجهود عاجزة عن توضيح الرؤية بل إنها تنحل إلى مجرد حلول خرقاء لأحجية مطيافية جديدة تتم عبر تعديلات نظرية اعتباطية. لقد بدا مرارًا لهايزنبرج وبولي أن ثمة خطأ تم تجاوزه؛ ليس في وسع النموذج تحمل أكثر من هذا القدر من الزخرفة دون أن تتقوض سلامته المفهومية. وفيما يذكر هايزنبرج،

"بدأ بعض منا يشعر أن نجاحات النظرية السابقة قد تكون راجعة إلى استخدام أنساق بسيطة بوجه خاص، وأن النظرية سوف تنهار حال اعتبار نسق أكثر تركيبًا".

كما لو أن علماء الفيزياء، في محاولتهم الكشف عن طبيعة الذرة الكمومية النزوية، كانوا يركنون هم أنفسهم إلى وسائل لاعقلانية.

الفصل الثامن

أفضل أن أكون إسكافيا

في سبتمبر من عام 1923، قام نيلز بور بأول زيارة له إلى شمال أمريكا؛ حيث ألقى محاضرات في هارفرد، وبرنستون، وكولمبيا، وأماكن أخرى، ثم اختتم زيارته بسلسلة تألفت من ست محاضرات في جامعة ييل. اعتبرت The New York Times هذا الحدث مهمًا جدًا جعلها تقوم بتغطيته؛ رغم أنها لم تحسن تهجئة اسم المحاضر بشكل صحيح. هكذا جاء في تلك المجلة أن الدكتور نلز بور [Nils Bohr] بدلاً من [Niels Bohr] سوف "يشرح نظريته في بنية الذرة، التي قبلها الكثير من العلماء بوصفها الفرض الأكثر وجاهة حتى الآن". كان هناك أيضًا عنوان فرعي يوضح مفاده يقول "إنه يصور الذرة بنواتها على أنها تناظر الشمس، في حين أن الإلكترونات تناظر الكواكب".

وبطبيعة الحال، لم تكن فكرة أن الذرة نسخة مصغرة من المجموعة الشمسية في ذلك الوقت مقبولة إلا بالكاد حتى بوصفها قياسًا مماثليًا فضفاضًا. في ييل، وصف بور تاريخ نظريات الذرة، وشرح كيف أصبحت المطيافية الأداة الأساسية في تقصي بنية الذرة، كما تحدث عن كيف أنه يفترض أن تسكن الإلكترونات في الذرات وتتحرك فيها، ولمح إلى الأحاجي العديدة التي تواجه المنظرين في ذلك الوقت. في كلمات وردت على لسانه في صحيفة الـ Times، اعترف بور بعجزه عن أن يصف بوضوح الذرة الكمومية بلغة مألوفة. "آمل أن أكون نجحت في إعطاء انطباع في أننا نتعامل مع نوع من الواقع - نوع من الربط بين الأدلة التجريبية والتنبؤ بأدلة تجريبية جديدة. وبطبيعة الحال، فإننا لا نستطيع عرض صورة من النوع الذي استخدمنا في

الفلسفة الطبيعية. إننا في حقل جديد الأساليب القديمة لا تعد فيه مجدية. بيد أننا نحن نحاول تطوير أساليب جديدة".

رغم بعض الاهتمام الذي كان يحظى به أحيانًا من الصحف، ما كان بمقدور بور أن يحظى بالشهرة والمجد اللذين حظيا بهما أينشتين. في السنة السابقة فاز بور بجائزة نوبل في الفيزياء بسبب رؤاه في بنية الذرات، ولكن حتى آنذاك طغت عليه شهرة أينشتين الذي منح في الوقت نفسه جائزة عام 1921 المتأخرة. ترشح أينشتين لجائزة نوبل عدة مرات، غير أن لجنة نوبل، بمعاييرها الصارمة، تلكأت في الاقتناع بالنسبية، في وقت كان هناك نقاد متحمسون ضدها وكانت الأدلة عليها ضئيلة. كاد أينشتين يفوز بالجائزة عام 1920، غير أن هناك شكوكًا أثيرت وتحفظات أبديت في اللحظات الأخيرة جعلت اللجنة تقرر منحها لتشارلز جويلوم [Charles Guilaume]، وهو سويسري قام بمعالجة صلب النيكل بحيث حصل على مادة ذات معامل تمدد حراري صغير، أثبتت فائدتها العظيمة لأجهزة القياس الدقيقة. أما جائزة أينشتين، حين منحت في النهاية، فقد كانت على نظريته في الأثر الكهرو – ضوئي، الذي تحققت منه تجارب ميليكان قبل بضع سنين، رغم أن ميليكان نفسه رفض قبول أن نتائجه برهنت على واقعية كموم الضوء.

بينت جائزتا نوبل لبور وأينشتين تناقضًا فاضحًا. كما كانت عادته آنذاك، قبل أينشتين واقعية كموم الضوء على ظاهرها، غير أنه لم يرض بالطريقة التي لوثت بها [تلك الكموم] علم الفيزياء بعناصر الانقطاع والمصادفة. على النقيض من ذلك، استحدث بور نموذجًا ذريًا فسر كيف تصدر وتمتص الذرات كميات ضئيلة من الضوء بترددات محددة، غير أنه صادف بعد ذلك صعوبة لأنه رفض قبول أن حزم الضوء هذه كانت أساسية بالفعل في الفيزياء.

بعد بضعة أسابيع، جاءت أخبار عن تجربة بدا أنها تحسم المسألة. في جامعة واشنطن في سينت لويس، نجح آرثر كومبتون [Arthur Compton] في ارتداد أشعة سينية من مجموعة من الإلكترونات وتحقق بدقة مما تنبأ به النموذج الكمومي.

حين يصطدم كم من الإشعاع بإلكترون، يرتد بطاقة أقل. غير أن قاعد بلانك تقول إن طاقة كل كم تتناسب مع تردد الإشعاع، ولذا فإن الطاقة المخفضة تعني ترددًا أدنى أو موجة طولية أطول. قياسات كومبتون تؤيد هذا التنبؤ. "إن هذا الاتفاق اللافت بين المعادلات والتجارب لا يبقي أدنى شك في أن الأشعة السينية المبعثرة ظاهرة كمومية"، أو هكذا استنتج.

أبلغ سمرفيلد الذي كان آنذاك يدرس في ماديسون بور بهذه الأنباء، وحين كان يتجول في أمريكا يلقي محاضرات في نظرية الكم، أكد للحاضرين أهمية هذه التجربة. نشرت اكتشافات كومبتون الحاسمة في مايو عام 1923 في Physical Review الأمريكية، التي تعد الآن أفضل دوريات علم الفيزياء في العالم، رغم أن الأوربيين لم يكونوا بالكاد يعرفونها آنذاك. (في لقاء أجري مع هايزنبرج عام 1962، يذكر أنه في البداية لم يكن أحد في ألمانيا يقرأ هذه الدورية لأنها بطبيعة الحال لم تكن وجدت أصلاً؛ رغم أنه كان مر عليها آنذاك ثلاثة عقود).

تعد ظاهرة تناثر الضوء التي اكتشفها كومبتون في كتب التاريخ الشاهد الحاسم على وجوب حمل كموم الضوء محمل الجد. لعل أغلب الفيزيائيين، مثل سمرفيلد، استجاب للإعلان بحماس وشعور بالامتنان. آخرون كانوا أكثر تحفظًا في القبول. غير أن استجابة بور تجاوزت الشك إلى العداء الصريح. بعناد لا يخلو من حمق، أصر بطريقة أكثر تصلبًا من أي وقت مضى على استحالة أن تكون كموم الضوء واقعية، وأمضى عامًا في إعداد مخطط نظرية في الإصدار والامتصاص الذرين تنكر عليها أي دور. إن هذه الواقعة تكشف عن الجانب المظلم في شخصية بور. لأنه كان مقتنعًا بأنه وحده القادر على رؤية الحقيقة، كان متصلبًا، ومستبدًا، ومتحصنًا ضد الاستدلال العقلي.

استبين لاحقًا أن نفور بور من اكتشاف كومبتون لم يكن مجرد مسألة حكم علمي. لقد كان رد فعله عنيفًا لسبب بسيط: أنه سبق أن سمع وأنكر الفكرة نفسها قبل عدة أشهر، حين فهم مساعده الخاص في كوبنهاجن النظرية التي أصبحت تعرف بأثر

كومبتون. آنذاك، أخمد بور أنفاس الفكرة غاضبًا، ما جعله مستعدًا إلى حد كبير للخوض في معركة حين قام كومبتون بالإعلان عن اكتشافه.

كان مساعد بور هو هندريك كرامر [Hendrik Kramers]، من أبناء روتردام. في عام 1916، ظهر كرامر على عتبة باب بور في كوبنهاجن، مؤهلاً بدرجة في الفيزياء وتواقًا لتعلم نظرية الكم. استبين أنهما زوجان مثاليان. ولأنه كان ذا قدرة سريعة على البحث وعالم رياضيات ثاقب الذهن، كانت لدى كرامر القدرة على فهم أفكار بور المبهمة وجعلها أحكامًا كمومية نظرية. فضلاً عن ذلك، كان في وسعه أن يحاضر بشكل واضح. لم تمض سنتان على وصوله إلى كوبنهاجن، حتى أصبح كرامر مبعوثًا غير رسمي لبور، يتحدث بشكل مقنع لجمهور ظل غالبًا متحفظًا ومرتابًا. كان كرامز يعرض حججًا دقيقة وحسابات محددة، عوضًا عن التأملات الفلسفية الغامضة التي يفضلها بور.

"بور هو الله وكرامر نبيه"، هكذا علق ولفجانج بولي، رغم أنه أعجب بمساعد بور كثيرًا. أحيانًا يكون كرامر، المعتز بنفسه وإن ظل يشعر بعوز في الأمان، لاسعًا وساخرًا. غير أن بولي اكتشف فيه روحًا متجانسة.

شجع بور كرامر على البحث في مسألة لم تكن حظيت بعد بالاهتمام الجديرة به. إذا كانت الخاصية الأبرز في الخطوط المطيافية هي الموجة الطولية أو التردد، فإن الخاصية الثانية الواضحة هي شدتها. بعض الخطوط أسطع من غيرها. يمكن العثور على بذرة التفسير في دراسة أينشتين الرؤوية عام 1916، التي بين فيها أن التحولات الذرية تمتثل لقانون في الاحتمال يتماهى مع قاعدة روثرفولد الاحتمالية في الانحلال الإشعاعي. كلما كان التحول أكثر احتمالاً، فيما اقترح بور لكرامر، توجب أن يكون الخط المطيافي المناظر أكثر سطوعًا.

غير أن تحليل أينشتين للطريقة الاحتمالية المفاجئة التي تشع بها الذرات ضوءًا

شكلت مبررًا آخر للاعتقاد في أن كموم الضوء كينونات مادية أصيلة. متأسيًا بهذه الخطوات، لم يكن في وسع كرامر سوى استيعاب الدرس نفسه.

وفق قصة لم يكشف عنها إلا مؤخرًا على يد كاتب سيرته ماكس درسدن[Max Dresden]، محتم أن كرامز أفكر في فترة ما من عام 1921 في الطريقة التي يمكن بها لكم الضوء أن يتفاعل مع جسيم من قبيل الإلكترون. سرعان ما خلص إلى قانون التصادم البسيط بشكل مرض والذي سوف يقوم كومبتون عما قريب باستخدامه بمثل هذا التأثير القوي. وفق ما تذكر زوجته، وهي مطربة لقبت باسم "العاصفة" [Storm] بسبب شخصيتها الجائحة، رجع كرامر ذات يوم "مستنفرًا بشكل جنوني". في اليوم التالي أخذ اكتشافه الخطير إلى بور. وبعد ذلك، فيما تذكر ستورم، اشتغل بور على زوجها، يفسر ويصر ويحكم المرة تلو الأخرى وبمختلف السبل بأن فكرة كم الضوء ليست وجيهة، أنه لا مكان لها في الفيزياء، أنها تعني الاستغناء عن نظرية الكلاسيكية الناجحة بشكل كبير في الكهرومغناطيسية، أنها باختصار لن تنجز المهمة الموكلة إليها. لم يكن لبور أن يتنازل عن موقفه. قبالة حسابات كرامر المباشرة، كان في وسع بور عرض ما عنّ له من الحجج المهمة، وإن ظلت مراوغة، وفيزيائية وفلسفية وتاريخية في طابعها. كان بور يتميز بأنه يستطيع أن يكون مقنعًا إلى حد كبير حتى إن لم تكن آراؤه وجيهة كلية. أنى ما رأى، بفضل استدلالاته المبهمة والمثيرة للإعجاب، الإجابة الصحيحة قبل أن يراها الرياضيون والحاسبون، تكرست شهرته بوصفه صوفي نظرية الكم. وحين كان يسعى بشكل لا يلين وراء فكرة خاطئة، كان بمقدوره أن يكون متنمرًا، ومباشرًا، وبسيطًا.

كانت الضغوطات قوية جدًا فأمرض كرامر، ولجأ إلى المستشفى وأمضى بها بضعة أيام. وما أن خرج منها، حتى استسلم كلية إلى إرادة بور. لقد تكتم كرامر اكتشافه لما سوف يعرف بعد قليل بأثر كومبتون، حدًا جعله يمزق أوراقه. لقد أصبح متحمسًا مثل بور، إن لم يكن أكثر حماسًا منه، في شجب كم الضوء والسخرية منه. وحين نشر كومبتون نتائجه، أخفى كرامر معرفة أنه سبق له حساب ما كشف عنه

كومبتون الآن للعالم، وانضم إلى رئيسه في البحث عن طريقة في مواصلة معركته ضد نتيجة غير مقبولة.

يظل تشبث بور هذا مسألة غامضة. يبدو أنه ترسخ في ذهنه أن قبول وجود كموم ضوء منفصلة سوف يقوض بشكل نهائي النظرية الموجية في الكهرومغناطيسية الكلاسيكية. آخرون، وأبرزهم أينشتين، فهموا تمامًا أن هناك تفاوتًا أساسيًا بين الرؤيتين، غير أنهم قرروا أن هذه مشكلة يتوجب على الفيزياء إطراحها جانبًا في الوقت الراهن، إلى أن يتسنى استيعاب كل هذه الأفكار بشكل أفضل.

ومهما يكن من أمر، هيأ بور وكرامر نفسيهما لإنقاذ رؤيتهما. ثمة مساعد آخر استدرج إلى هذه الشبكة. بعد أن حصل على درجة الدكتوراه من هارفرد، بدأ جون سي. سلاتر [John C. Slater] جولة في أوربا في خريف 1923؛ حيث توقف في كيمبردج بضعة أشهر قبل أن ينتقل إلى كوبنهاجن. ومثل معظم علماء الفيزياء الشبان، تبنى سلاتر كموم الضوء دون تحفظ. غير أنه حين كان في كيمبردج، موطئ رأس نظرية الإشعاع الكلاسيكية، رأى بشكل مبهم كيف يمكن قبول كموم الضوء دون التخلي كلية عن النجاح الذي لا مراء فيه والذي حققته الموجات الضوئية. قدّر سلاتر أنه يتعين وجود الاثنين. لقد تخيل المجال الإشعاعي، حسب الرؤية الكلاسيكية تقريبا، لكنه عدّل في مقاصد هذا المجال. إنه موجود لترشيد حركة كموم الضوء وتسهيل تعاملها مع الذرات.

بعد وصوله إلى كوبنهاجن، وجد سلاتر أن فرضه الجنيني قد استقبل استقبالاً دافئًا. ركز بور وكرامر تحديدًا على اقتراح مجال مؤسس يتفاعل بطريقة ما مع الذرات، يحدد كيف ومتى تصدر أو تمتص الضوء. غير أنهما لم يتحمسا بشكل كاف لفكرة سلاتر أن المجال الإشعاعي سوف يرشد حركة مرور كموم الضوء. لقد اشتغلا على الزائر الشاب، مكررين بلا توقف حجة تثمن براعة فكرته التي يمكن أن يعاد تشكيلها في صورة نظرية مقبولة. بدأ ثلاثتهم في إعداد بحث مشترك. هكذا كان بور يفكر بصوت عال، وكان كرامر يدون الملاحظات بأفضل ما يستطيع، فيما

كان سلاتر يقف منتظرًا. في رسائل بعث بها إلى موطنه، أعرب سلاتر عن شدة إثارته من حمل أفكاره محمل الجد من علماء ليس أقلهم بور. كان واثقًا من أنه سوف يرى البحث مكتملاً عما قليل، أو هكذا أضاف. بنهاية يناير 1924، أرسل البحث للنشر - بسرعة مدهشة نسبة إلى عمل يحمل اسم بور. كانت ترتيب المؤلفين على النحو التالي: بور، كرامر، سلاتر [ب ك س].

وبشكل مميز، لم يعرض بحث ب ك س نموذجًا كميًا مشكلاً على نحو محكم؛ بل اسكتشًا غير رياضي، مخطط نظرية ممكنة. لم يشمل سوى معادلة غاية في البساطة. لقد وصف البحث بلغة كيفية صرفة نوعًا جديدًا من مجالات الإشعاع يحيط بالذرات، يؤثر في امتصاصها وإصدارها الضوء، وينقل الطاقة بينها.

ثمة مكون جديد آخر، لم يكن أصيلاً في ب ك س بل تم تبنيه من اقتراح أسبق. وكما شرح بور لجمهوره في ييل، لم يعد في الوسع حمل فكرة دوران الإلكترونات حول النواة على طريقة الكواكب محمل الجد، غير أنه لم يكن هناك أي تصور أفضل. هكذا استخدم ب ك س الحيلة التالية: لقد صور الذرة على أنها فئة من "المذبذبات الافتراضية"، يناظر كل منها خطًا مطيافيًا بعينه. بتعبير أوضح، كل المذبذبات البسيطة - البندول، الثقل المعلق في نابض، الإلكترون المندفع هنا وهناك - تمتثل أساسًا للقانون الرياضي نفسه. لتجنب التحديد، استخدم ب ك س فيزياء الأنساق المذبذبة القياسية دون محاولة ربط المذبذبات المفترضة صراحة بالكيفية التي تتحرك بها الإلكترونات في الذرة. كل هذا يتسق مع روح ب ك س، الذي استهدف بوضوح تأمين مخطط نظرية ممكنة، و لم يقصد منه أن يكون نموذجًا مكتملاً.

هناك عبارة في ب ك س توجز طبيعة مقترحهم الغامضة والأسلوب المراوغ بشكل محبط الذي يميز نثر بور: "سوف نفترض أن ذرة معطاة في حالة سكون سوف تتواصل بشكل مستمر مع ذرات أخرى عبر آلية زمان – مكانية تتكافأ عمليًا مع مجال الإشعاع الذي ينشأ وفق النظرية الكلاسيكية عن المذبذبات المتناغمة الافتراضية التي تناظر مختلف التحولات الممكنة مع الأوضاع الساكنة الأخرى".

يبدو أن بور يعتقد، مثل أي محام، أنه ليس في وسع علامات الترقيم إلا أن تورث الغموض. من اللافت أيضًا، إذا ما أمعنا النظر، قدر ضبابية لغته. الحجج الحاسمة إنما يعبر عنها في شكل أزمنة شرطية، وهي تركن إلى تعبيرات ذات محتوى غامض مقصود: تتواصل مع، عبر آلية زمان – مكانية تتكافأ عمليًا .... العناية المفرطة ـ حيث تكتب كل عبارة، وتعاد كتابتها، ثم تكتب مرة أخرى ـ واضحة تمامًا، لكن النتيجة المثيرة هي أنه كلما أجهد بور نفسه في التعبير عنها، تراجع المعنى الذي يريد. وعلى حد تعبير أينشتين، فإن بور "يدلي بآرائه مثل شخص يتحسس طريقه، وليس مثل شخص يعتقد في أنه قد امتلك ناصية الحقيقة المؤكدة". يستبان أن المقصود من هذا هو الثناء عليه، غير أن معاونًا لاحقًا اعترف بأن أسلوب بور يعاني من خلل: "ليس في وسعك أن تلزم بور بأي إقرار؛ إنه يعطيك دائمًا الانطباع بأنه يراوغ، وبالنسبة لمن لا يعرفه، فإن أداءه غاية في الرداءة".

من بين المقترحات المسرفة في الإبهام التي يشملها ب ك س ويوزعها بالمجان، تبرز نتيجة فجة: وفق نظريتهم، لا يحافظ بشكل مطلق على الطاقة. لأن بعث وامتصاص الطاقة يحدثان وفق قواعد الاحتمال، قد تختفي الطاقة في مكان وتعود في آخر ـ أو العكس بالعكس ـ دون أي ارتباط دقيق بين هذين الحدثين، وفق قانون السبب والنتيجة العتيق. إن مجال الإشعاع الغامض يسلك بوصفه نوعًا من التعاقد مع الطاقة، بحيث تكون الحسابات صحيحة على المدى الطويل، في حين قد تكون هناك على المدى القصير ودائع أو تجاوزات مؤقتة في السحب.

كان بور تواقًا لحظر كل إشارة إلى كموم الضوء التي يقول بها أينشتين، لأنه أراد الحفاظ على النظرية الموجية الكلاسيكية، حدًا جعله يرمي قانون بقاء الطاقة الكلاسيكي من النافذة. غير أنه يتضح أنه ليست هناك مصالحة سهلة بين هذه الأفكار المتناقضة.

في عرض غريب لعوز الثقة، ربما لأنه عرف ما تكونه الإجابة، لم يتجه بور مباشرة إلى أينشتين، بل طلب من بولي أن يعرف رأي الرجل العجوز في ب ك س. "متكلف

بالكامل"، بل إنه "degoutant" (استخدم الكلمة الفرنسية) [غير مستساغ]؛ هكذا وصف أينشين المقترح، فيما قال بولي، متوسعًا في توضيح كيف أنه معارض له كلية. أيضًا كتب أينشتين إلى ماكس بورن قائلاً: " أفضل أن أكون إسكافيًا؛ بل عاملاً في ناد للقمار على أن أكون فيزيائيا"، إذا كان هذا هو مآل النظرية. بورن نفسه، حين سئل بعد عدة سنين عن ب ك س، رد متسائلاً على من أجرى معه المقابلة بقوله: "هل تستطيع أن تشرح لي ماذا كانت نظرية ب ك س؟ إنه شيء لم أفهمه إطلاقًا بشكل مناسب في حياتي كلها".

غير أن عمر [هذا البحث] لم يكن طويلاً. لقد اضطر بور، وكرامر، وسلاتر إلى الحجاج عن أن نتائج كومبتون لم تثبت سوى حقيقة إحصائية. حالات التصادم الفردية بين الأشعة السينية والإلكترونات لن تحفظ الطاقة ضرورة، لكنه في المجمل، سوف تخفي التعارضات بعضها البعض. بيد أن تجارب جديدة أجراها كومبتون وآخرون أثبتت بطلان هذا الحكم. حالات الصدام الفردية تمتثل بدقة للقاعدة المتوقعة وتحافظ على الطاقة تمامًا.

بحلول ربيع 1925، اعترف بور بأن ب ك س كان إخفاقًا تامًا. ظل سلاتر يحس بالمرارة طيلة عمره بسبب الطريقة التي شوهت بها أفكاره حتى غدت شيئًا لم يوافق عليه حقيقة، أو هكذا قال لاحقًا. أما بالنسبة لكرامر، فإن فشل ب ك س، الذي تبع التكتم القهري على اكتشافه تناثر الضوء، أنهى طموحه في أن ينتج يومًا فيزياء عظيمة حقيقة. أصيب بكآبة متوسطة الحدة، وفق كاتب سيرته، وأصبح منذ ذلك الحين أكثر اعتدالاً في توظيف خياله العلمي.

ورغم كل ذلك، ظل مقترح ب ك س يشكل نقطة تحول. وفقًا على تأويل المرء لما تكونه النظرية، فإن ذلك البحث إما آخر نفس في محاولات تأسيس نظرية الكم على نوع من الأسس الكلاسيكية أو أول إثبات على أنه مقدر على مثل هذه الجهود أن تفشل.

يستبان حين نستعيد الآن ما حدث أن أكثر مكونات ب ك س تأثيرا إنما يتعين في كونه دخل دائرة الجدل ـ على نحو شبيه بمقترح بلانك الأصلي في كم الطاقة ـ كنوع من التحايل على صعوبات أخرى. هكذا كان استخدام المذبذبات الافتراضية المعرفة بشكل رديء بوصفها وسيلة للحديث عن كيفية إصدار الذرة وامتصاصها الضوء، مع تجنب أي نقاش لما تقوم به الإلكترونات بدقة في الذرة.

بتطوير هذه الفكرة، أثبت كرامر لاحقًا ـ بطريقة رياضية محكمة، في مقابل طريقة ب ك س المفهومية الغامضة ـ أن صورة المذبذبات ليست مجرد مراوغة مناسبة. من الفئة المناسبة من المذبذبات الافتراضية يمكن حساب تفاعل الذرة بأكمله مع ضوء بأي تردد، أو هكذا أثبت كرامر. كل الفيزياء اللازمة موجودة هناك.

ولكن هل كان هذا يعني أنه يمكن الاستغناء كلية عن الصورة القديمة لأفلاك الإلكترون؟ يبدو أن كرامر لم يعتقد في ذلك. عنده، كانت هذه المذبذبات الافتراضية مجرد بديل مؤقت لتفاصيل نموذج ذري مؤسس يعمل بطريقة أو أخرى وفق مسارات تقليدية.

تبنى آخرون رؤية معاكسة. لقد كتب بولي إلى بور رسالة طرح فيها المسألة الحاسمة: "يبدو لي أن السؤال الأكثر أهمية هو التالي: إلى أي حد يسمح بالحديث أصلا عن أفلاك إلكترونية محددة... في رأيي أن هايزنبرج تبنى الموقف الصحيح من هذه المسألة، فهو يشك في إمكان الحديث عن أفلاك محددة. حتى الآن لم يعترف لي كرامر بصحة مثل هذه الشكوك".

ما أن رأى هايزنبرج نظرية كرامر في المذبذبات الافتراضية، حتى أدرك مضامينها الثورية، وصمم مباشرة على تحرير الفكرة من مرساتها التقليدية. سوف يكون هو من يحول هذا الاختراع المفهومي الجريء إلى نظرية جديدة في الذرات ـ بل يحولها في الواقع إلى نظرية جديدة في الفيزياء.

الفصل التاسع

شيء ما حدث

حين عاد سمرفيلد من ماديسون في ربيع 1923، رجع هايزنبرج من جوتنجن إلى ميونخ كي يكمل رسالته في الدكتوراه. ولتحقيق هذه الغاية واصل [هايزنبرج] مشروعًا في ديناميكا الموائع الرياضية، غير المتعلقة بنظرية الكم، غير أنه كان موضوعًا نمطيًا. على ذلك كان امتحان رسالته صعبًا. ولأنه كان لزامًا عليه أن يثبت اقتداره في الفيزياء بوجه عام، بنوعيها التجريبي والنظري، سجل هايزنبرج على مضض في مادة معملية تحت إشراف فيلهلم فين [Wilhelm Wien]، أستاذ الفيزياء التجريبية في ميونخ. كان فين باحثًا مميزًا، وكانت قياساته الدقيقة لمطياف الإشعاع الكهرومغناطيسي حاسمة لطرح بلانك للفرض الكمومي عام 1900. كان فين الغضوب، المحافظ في العلم كما في السياسة، مرتابًا بخصوص ابتكار بلانك، وقد عبر علنًا عن استهجانه لنظرية الكم في الذرات التي كان زميله سمرفيلد يقوم بصياغتها.

لا غرو إذن أن فين كان ينزع لإبداء عدائه لآخر غرائب سمرفيلد العبقرية، و لم يسهم ازدراء الشاب الصغير [هايزنبرج] الذي فشل في إخفائه للأمور التجريبية إلا في جعل الأمور أكثر سوءًا. في امتحان هايزنبرج الشفهي، أمطر فين المرشح لنيل درجة الدكتوراه بوابل من الأسئلة عن عمله المعملي، وقد كان يفترض أن يكون قادرًا على الإجابة عنها بسهولة، غير أنه لم يفعل بسبب إهماله ولامبالاته. لقد أراد فين أن يعرف قدرة التباين الضوئي في جهاز بصري بعينه، لكن هايزنبرج لم يستطع تذكر المعادلة التي تقرها الكتب المنهجية، فحاول أن يستنتجها في الأثناء، لكنه أخطأ في استنتاجها. صدم فين. بعد مفاوضات مكثفة مع سمرفيلد، أقر بعد تردد أن

هايزنبرج قد أفصح عن دراية مناسبة بمجال الفيزياء الواسع. حصل الشاب الذكي على الدكتوراه، ولكن بدرجة لا تكاد تفوق المقبول.

بعد أن انتابته الحيرة بعض الوقت، أسرع إلى جوتنجن للتأكد من أن خطته التي سبقت الموافقة عليها والتي تقضي بقضائه السنة التالية هناك لا تزال تحظى بموافقة بورن. وبعد أن اكتشف أنها كذلك، غادر هايزنبرج مباشرة إلى فنلندا مع رفاق من جماعة Pfafinder [البحث عن الطريق] لإنعاش روحه في بحيرات الشمال وغاباته. بحلول سبتمبر كان في جوتنجن، متطلعًا إلى أن يضع الدكتوراه التي حصل عليها وراء ظهره، صحبة كل زعم بالاهتمام بالفيزياء التجريبية، وتكريس نفسه لجملة الأحاجي المربكة التي كانت تهدد بعرقلة نظرية الكم.

كان هايزنبرج يجمّع مفاتيح الحل. في مارس من العام التالي، قام بزيارة قصيرة إلى كوبنهاجن ـ وكانت تلك أولى زياراته لها ـ حيث وجد بور وكرامر في أوج الحماس لمقترح ب ك س. ورغم أنه رفض الفكرة برمتها، بقي جزء من مخطط النظرية ـ المذبذبات الخائلة [أو الافتراضية] ـ في ذهنه. لم يكن هناك آنذاك حتى تصور نصف وجيه في الطريقة التي تسلك بها الإلكترونات، ولذا بدا أنه أشبه ما يكون باستراتيجية بارعة، ولعله أكثر من ذلك، للتخلي عن كل تلك المشاغل التقنية بأفلاك الإلكترونات، واعتبار الذرة أنها مجموعة من المذبذبات المتناغمة مع الترددات المطيافية المناسبة.

ما كان بمقدور أحد أن يعرف ماهية هذه المذبذبات، وفق مفاهيم فيزيائية مفصلة. غير أن هذا هو بيت القصيد. لقد كان المراد منها استيعاب الخصائص الملاحظة التي تختص بها الذرات، وليس فهم بنيتها الداخلية، التي قد لا تكون طيعة لاستحداث النماذج بالطريقة التقليدية، وهذا ما ألمح إليه بور بشكل غامض فترة من الوقت. غير أن التفكر من منظور هذه المذبذبات منح المنظرين حرية في الحركة.

في الأثناء، في جوتنجن، كان بورن يطور خطته الخاصة. لقد نشر بحثًا يدعو فيه إلى نسق جديد في "ميكانيكا الكم" ـ وهذه أول مرة يظهر فيها هذا المصطلح ـ الذي

كان يقصد به بنية من القواعد الكمومية تمتثل لمنطقها الخاص، ولا تتبع ضرورة مَمليات الميكانيكا النيوتونية التقليدية التي بجلّت زمنًا طويلاً. عند بورن، الفروض المبتسرة، والمماثلات القصية من النوع الذي نجده في ب ك س، ليست بأي حال مجدية. لقد عوّل على الرياضيات في إلقاء الضوء على المستقبل، وكانت في ذهنه حيلة بعينها.

لغة الفيزياء الكلاسيكية هي حساب التفاضل الذي استحدث من قبل نيوتن وبشكل مستقل من قبل ليبنتز للتعامل مع التنوع المستمر والتغير المتراكم. غير أنه في محاولة فهم ما تقوم به الذرات، واجه الفيزيائيون ظواهر مفاجئة، تلقائية، ومتقطعة. تكون الذرة في وضع، ثم تكون في آخر، دون أن يكون هناك انتقال سلسل بين الوضعين. لم يكن في مكنة حساب التفاضل والتكامل التقليدي التعامل مع مثل هذه الحالات غير المتصلة. هكذا قام بورن، بمقتضى الضرورة، باقتراح حساب الفروق - وهو نسق رياضي تتعين عناصره الأساسية في الاختلافات بين الأوضاع بدلاً من الأوضاع نفسها.

ارتأى هايزنبرج أن ثمة علاقة تربط هذا بما كان يقوم به كرامر بالمذبذبات الخائلة. تهب كلتا المقاربتين التحولات بين الأوضاع منزلة الصدارة، وتدفع بالأوضاع المؤسسة شطر الأطراف. باستيعاب هذه الأفكار، خلص هايزنبرج إلى حجة ذكية تبرر نظريًا إحدى معادلات نصف الكم الغريبة التي كان هو ولاندي قد أملياها إمبيريقيا منذ فترة. خطوة قصيرة، مجهولة المغزى، غير أنها قد تكون خطوة في الاتجاه الصحيح.

بعد ذلك، خلال صيف 1924، كان هناك هدوء مؤقت، فاصطحب هايزنبرج ثانية رفاقًا من جماعة Pfafinder هذه المرة إلى بافاريا. بور، الذي أرهقته سنون من العمل في تأسيس معهده وإدارته، فضل قضاء إجازة الصيف مسترخيًا في جبال الألب السويسرية وفي كوخه الريفي خارج كوبنهاجن. أما رذرفورد، الذي لم يكن شخصية كسولة، فقد أثنى على بور لأنه أحسن الاختيار بأخذه إجازة طويلة. فيما تبقى من عام 1924، وفي العام التالي، بقيت ميكانيكا الكم في حال كمون.

سبق لأينشتين أن أخبر بورن أنه يفضل أن يكون إسكافيًا على أن يتعامل مع نوع الفيزياء التي كان بور، وكرامر، وسلاتر منشغلين به. غير أنه لم يكن الوحيد الذي هدد بترك العمل. في رسالة بعث بها إلى زميل في مايو 1925، قال بولي ومشاعر الأسى تنتابه "إن الفيزياء أصبحت الآن جد مشوشة مرة أخرى- وعلى أية حال، فإنها غدت عصية علي، وكان بودي أن كون ممثلاً سينمائيًا كوميديًا أو أي شيء من هذا القبيل وألا أكون قد سمعت إطلاقًا عن الفيزياء. إنني الآن لا آمل سوى أن بور ينقذنا بفكرة جديدة". (كانت أفلام شارلي شابلن رائجة في ألمانيا آنذاك).

غير أنه كانت لبور رؤيته الخاصة في مصدر العون المرتجى. "أصبح الآن كل شيء في يد هايزنبرج - كي يجد سبيلاً لحل الصعوبات"، أو هكذا أخبر عالمًا أمريكيًا كان يزور كوبنهاجن في تلك الأثناء.

أخيرًا، في سبتمبر عام 1924، ذهب هايزنبرج إلى كوبنهاجن ليبقى هناك عدة أشهر. لقد اختار أن يصل في وقت علم أن كرامر لن يكون فيه هناك. ولأن كرامر كان أكبر سنًا بسبعة أعوام، وإن ظل مظهره وسلوكه ينبئان بأنه أكبر حتى من ذلك، كان هو الفيزيائي الشاب الوحيد الذي يرهبه هايزنبرج قليلاً. كان هايزنبرج يعزف على البيانو، في حين كان كرامر يعزف على الشيلو والبيانو. جاهد هايزنبرج في تعلم اللغتين الدنمركية والإنجليزية، فيما أتقن كرامر الحديث بعدة لغات. لم يكن غزير المعرفة فحسب، لكنه كان متشبثًا بآرائه. وفي حين حسب بولي أن كرامر شخصية مسلية، وجده هايزنبرج مسرفًا في المجاملة. بعد سنين قال هايزنبرج (وفي وسع المرء أن يسمع صرير أسنانه)، إن كرامر "كان دائمًا سيدًا مثاليًا، بكل السبل؛ لقد كان سيدًا أكثر مما يجب".

وبطبيعة الحال، كانت هناك علاقة قوية تربط كرامر مع بور، ولم يكن في وسع هازنبرج سوى أن يحسده عليها.

في كوبنهاجن، شرع هايزنبرج في تنفيذ مشروع بحثي، غير أنه لم يلبث حتى

احتك ببور وكرامر، اللذين دابا على التدقيق في كل ما قام المعهد بنشره، وقدما لهايزنبرج قائمة بنواقص الورقة البحثية التي رغب في نشرها. وفي هذا يقول هايزنبرج "لقد صدمت تمامًا ...وغضبت كثيرًا"؛ غير أنه دافع بضراوة عن موقفه. في الأمور الشخصية، قد يكون خجولاً، غير أنه كان في علمه حازمًا لا يلين. رد على الاعتراضات، وكتب بحثًا وافق بور على نشره (ولكن ليس قبل جولة مراجعات أثارت سخط هايزنبرج). اكتسب هايزنبرج ثقة من هذه التجربة، كما تعلم أنه قد يكون من الحكمة أحيانًا أن يحتفظ المرء بأفكاره لنفسه فترة من الوقت.

ثمة فقرة كتبها بولي إلى بور، قبيل رحلة هايزنبرج الأولى إلى كوبنهاجن، جديرة بالاقتباس لكونها تكشف عن شخصية هايزنبرج العلمية:

"دائمًا ما تسير الأمور على نحو غريب معه. حين أتأمل أفكاره، فإنها تبدو لي موحشة، فألعنها بيني وبين نفسي. إنه شخصية غير فلسفية تمامًا ـ إنه لا يحفل بتطوير مبادئ واضحة ولا بربطها بنظريات قائمة. ولكن حين أتحدث إليه، أعجب به كثيرًا، وأرى أن لديه مختلف أنواع الحجج الجديدة ـ أقله في قلبه. هكذا لاحظت ـ فضلاً عن كونه على المستوى الشخصي رجلاً طيبًا ـ أنه مميز، وعبقري، وأعتقد أن بمقدوره أن يسهم في تطوير العلم مرة أخرى .. آمل أن تستطيعا سوية أن تخطوا خطوة كبيرة في النظرية الذرية .. آمل أيضًا أن هايزنبرج سوف يرجع إلى بلده بموقف فلسفي في تفكيره".

وهكذا فعل، إلى حد قليل على أقل تقدير. خلال تعاون قصير ومربك مع كرامر، ترسخ اعتقاد هايزنبرج في تصور الذرة بوصفها مجموعة من التذبذبات المتناغمة. كان منظوره لما يتوجب أن تكون عليه نظرية الذرات يتطور بسرعة. النموذج المشكل على غرار سمرفيلد القديم؛ حيث تدور الإلكترونات حول أفلاك محددة تمامًا تحكمها الميكانيكا الكلاسيكية، ذهب الآن إلى غير رجعة. وبطبيعة الحال، لم يكن لدى هايزنبرج أي بديل لمثل هذا النموذج. غير أن تركيزه كان يتحول بطريقة مستمرة. كن أقل انشغالاً بما تكونه الذرات؛ فكر أكثر في ما تقوم به.

غير أن المنظور المتغير لا يكون مفيدًا إلا حين يقود إلى نظرية حقيقية. لقد تعين على هايزنبرج أن يجد طريقة ما في منح شكل منطقي لأفكاره المتطورة. عاد ثانية إلى جوتنجن، يتأمل في الأمر المرة تلو الأخرى، حتى وجد سبيلاً إلى التقدم عبر القفز إلى الماضي. ما تعلق به عقله المتجول الآن كان آلة سلسلة فوريه [Fourier] الرياضية التي مضى عليها قرن من الزمان.

في المثال الكلاسيكي، وإن ظل مهما، أي تذبذب يحدث في وتر الكمان، مهما كان خشنًا أو متنافر النغمات، يساوي توليفة محددة من نغمات الوتر الخالصة، أساسها وتجانسها. كان سبق لهايزنبرج أن تصور الذرة على أنها فئة من المذبذبات. أما الآن فقد خطر له أن يذهب بهذا التصور إلى منتهاه. في محاضرة ألقاها بعد ثلاثة عقود، قال "لقد اقترحت الفكرة نفسها، أنه يتعين على المرء أن يدون القوانين الميكانيكية ليس في شكل معادلات خاصة بمواضع الإلكترونات وسرعتها؛ بل في شكل معادلات خاصة بالترددات وسعاتها وفق مقياس فورييه".

لا تنجح عبارة هايزنبرج المخففة في توضيح الطبيعة الغريبة والمتطرفة لما كان يقصده. في الفيزياء الكلاسيكية، يشكل موضع الجسيم وسرعته خصائصه المميزة، العناصر الأساسية التي تنطبق عليها قوانين الميكانيكا. غير أنه في حالة إلكترونات الذرة، فإن هايزنبرج يقترح الآن جعل الترددات وشدة التذبذبات، التي مازالت افتراضية، العناصر الأولية في حساب جديد، بحيث لا يتم تحديد موضع الإلكترون وسرعته إلا بشكل ثانوي، وفق قوة المذبذب. كان هذا مفهوما ثوريا وعكسيا. بدءا من بور وسمرفيلد، تعينت الفكرة الأساسية في نظرية الكم القديمة في فهم كيف تتحرك الإلكترونات في الذرة، واشتقاق ترددات الذرة المطيافية من هذه الحركات. لقد عكس هايزنبرج هذا المنطق كلية. سوف تكون الترددات المميزة العناصر الأساسية في فيزيائه الذرية، فلا يعبر عن حركات الإلكترونات إلا بشكل غير مباشر.

"لقد اقترحت الفكرة نفسها"؛ هكذا عبر هايزنبرج عما حدث بعد عدة سنين - غير أنها اقترحت نفسها له وليس لأحد غيره. إن قفزة هايزنبرج هنا تذكرنا

بقفزة قام بها أينشتين حين اقتيد إلى نظرية النسبية، عبر إعادة فحص مفهومي الزمان والموضع البدهيين. إن الارتياب المستنير في البدهي قد يكون علامة العبقرية.

غير أن العبقرية تتطلب جلدا. لم يكن صعبا على هايزنبرج أن يدوّن، بطريقة رياضية صورية، معادلات تعبر عن موضع الإلكترون وسرعته بوصفهما توليفات من تذبذبات الذرة الأساسية. غير أنه حين قام بإدراج هذه التعبيرات المركبة في معادلات الميكانيكا التقليدية، كان الناتج فوضى عارمة. لقد أصبحت الأعداد المفردة قوائم من الأعداد؛ الجبر واضح المعالم أصبح صيغا مشوشة ومكررة. لأسابيع جرب هايزنبرج حسابات مختلفة، مارس ألعابا جبرية باستخدام سلسلة فورييه، تعثر دون جدوى، ثم توقف عندما أصيب دماغه بنوبة ضارية من حمى القش.

في السابع من يونيو استقل القطار الليلي إلى الساحل الشمالي من ألمانيا. كان وجهه ملتهبا ومحمرا حتى حسبت صاحبة فندق توقف فيه لتناول الإفطار اليوم التالي أنه قد أوسع ضربا - وهذا لم يكن غريبا في ألمانيا منتصف عشرينيات القرن الفائت. بعد ذلك استقل عبّارة لجزيرة من جزر هيلجولاند الجرداء، تبعد حوالى خمسين ميلا في بحر الشمال. كانت هيلجولاند قاعدة عسكرية خلال الحرب العالمية الأولى، وقد أصبحت آنذاك منتجعا يرتاده بوجه خاص الباحثون عن العزلة وهواء البحر النقي.

بقي هايزنبرج هناك أسبوعا ونصف، يتسلق الجبال المحيطة بالشاطئ، يرتاح ويقرأ أعمالا لجوته، يكاد لا يتحدث إلى أحد، بل يفكر، دائما يفكر. المنتجع عند هايزنبرج يعني دائما العودة إلى الطبيعة، إلى الجبال والغابات والمياه. تدريجيا هدأت نفسه. في هذا المكان المعزول استطاع أن يجعل عقله يركز على الفيزياء.

ما أتى بهايزنبرج إلى طريق مسدود لم يكن أحجية مفهومية كبيرة بل مشكلة ضرب أساسية. لقد حول الوضع والسرعة من أعداد مفردة إلى مجاميع متعددة المكونات. ضرب عددين معا ينتج عددا آخر. ضرب قائمتين من الأعداد معا ينتج صفحة كاملة تعج بالأعداد الممكنة، تتكون من كل عنصر في القائمة الأولى مضروبا في كل عنصر

من القائمة الثانية. ولكن أي الأعداد مهمة حقيقة، وكيف تتوجب إضافتها لتوليد ناتج يحوز معنى؟

في محاولته الجاهدة لجعل هذه الفوضى نظاما، وجد هايزنبرج إجابته عبر التركيز على الفيزياء لا الرياضيات. كانت عناصر نظريته الجبرية تذبذبات، يمثل كل منها تحولا من وضع إلى آخر. لقد رأى أنه يتعين على حاصل ضرب كل عنصرين من مثل هذا العناصر أن يمثل تحولا مزدوجا، تحول وضع إلى وضع ثان، ثم تحولا من الثاني إلى ثالث. الطريقة المناسبة لتنظيم جدول الضرب هذا، فيما خلص هايزنبرج، إنما تتعين في التوليف بين عناصر تناظر الوضع الابتدائي والنهائي، ثم جمع كل الأوضاع المتوسطة. لقد بينت له هذه الملاحظة ـ بعد القيام ببعض الجهد بطبيعة الحال ـ السبيل إلى استحداث قاعدة ضرب يمكن التعامل معها، وتظل تحوز على معنى منطقي.

في الثالثة من صباح أحد الأيام، حين كان مستلقيا يجفوه النوم في نزل صغير، عرف هايزنبرج أنه حصل على الأداة التي تمكنه من القيام بالحساب في نظريته الميكانيكية الجديدة. لقد تسنى له مثلا تدوين صياغة رياضية للطاقة الميكانيكية في نسق ما، معبر عنها باستخدام حسابه الغريب. لم يكن هناك ما يضمن حصوله على إجابة مفيدة. لقد كان في وسع أسلوبه المركب أن يفضي إلى هراء لا معنى له.

نهض من فراشه وحاول أن يفهم. في وضعه المحموم هذا، ارتكب الكثير من الزلات والأخطاء، ومرارا كان عليه أن يبدأ من جديد. غير أنه حصل في النهاية على إجابة لم يكن ليحلم بها. اكتشف ومشاعر البهجة والذهول تغمره أن نظريته الرياضية الغريبة تفضي حقيقة إلى نتيجة متسقة فيما يتعلق بطاقة المنظومة ـ طالما كانت الطاقة ضمن فئة مقيدة من القيم. الحال أن شكله الميكانيكي الجديد كان شكلا مكموميا من الميكانيكا.

كان هذا لافتا لكنه لم يكن مفسرا إطلاقا. في كل المحاولات السابقة التي أجريت في سياق النظرية الكمومية في الذرات، كان يتعين على عالم الفيزياء أن يوظف في

مرحلة ما قاعدة بلانك المكمومية الأصلية أو تنويعة قريبة منها. غير أن هايزنبرج لم يقم بأي شيء من هذا القبيل. لقد كان يدون المعادلات القياسية الخاصة بنسق ميكانيكي بسيط، يدرج تعبيراته المركبة الغريبة عن الوضع والسرعة، يطبق قاعدة الضرب التي استحدث ـ ويجد أن النتائج الرياضية المحولة لا تكون متسقة إلى حين تأخذ الطاقة قيمة بعينها.

بتعبير آخر، كان نسقه يكوم نفسه، أي دون حاجة إلى تدخل من جانبه. وتماما كما أن بلانك رأى قبل ربع قرن مضى أنه يتعين على الإشعاع أن يكون مكموميا، فإن هايزنبرج اكتشف الآن، بطريقة مختلفة تماما، أنه يفترض في طاقة النسق الميكانيكي أن تكون مكمومية هي الأخرى. لقد كان هذا رائعا بقدر ما كان غامضا.

منتشيا، وغير قادر على النوم، خرج هايزنبرج إلى الشاطئ. آنذاك بدأت خيوط الفجر الأولى تتسلل، وحين صعد على صخرة، كانت الشمس قد نهضت تعلن صباحا جديدا. ما حصل عليه كانت هبة من السماء، أو هكذا أفكر، اكتشافا من نوع غير مبرر وغير متوقع. استلقى على الصخور تحت أشعة الشمس الدافئة، يملؤه العجب بالاتساق الجميل الذي اتسمت به حساباته الغريبة، ثم قال لنفسه، وفق ما تذكر لاحقا، "حسن، شيء ما حدث".

غير أن هناك شيئا أزعجه. لم تكن قاعدة الضرب التي استحدث قابلة للعكس. س ضرب ص لا تساوي ضرورة ص ضرب س. كان هذا شيئا جديدا عليه. غير أنه لبى ما احتاج إليه وما اقتضته الفيزياء الجديدة.

في طريقه إلى جوتنجن، مر بهامبورج، استشار بولي، الذي حثه على تدوين أفكاره بسرعة. في رسائل بعث بها إلى بولي في الأسابيع التالية، شكا من أن تقدمه بطيء، وأن الأمور برمتها ليست واضحة تماما لديه، ومن أنه لم يكن يعرف عن أي شيء سوف تتكشف ـ غير أنه مرر إليه في الوقت نفسه آخر ما توصل إليه من خلاصات، مجموعة من الأفكار والنتائج من شأنها أن تشكل العمود الفقري لرؤيته المتطورة في ميكانيكا

الكم. بحلول بداية شهر يوليو، كتب ما أسماه "البحث المجنون"، الذي عرض فيه اكتشافه. أرسل بنسخة منه إلى بولي. كان يتوق إلى سماع حكم صديقه، لكنه كان قلقا أيضا. لقد كان مقتنعا، فيما أخبر بولي، بأن عملية النأي عن مفهومي الوضع والسرعة الكلاسيكيين أصبحت تسير في الطريق الصحيح؛ غير أنه ظل غير متأكد من صحة صيغته الجديدة لهذين المفهومين. هكذا أسر إليه بأن هذا الجزء من البحث بدا "صوريا وضعيفا؛ ولكن لعله بمقدور الناس الذي يعرفون أكثر مني أن يجدوا شيئا وجيها في هذا". توسل إلى بولي أن يرد على مخطوطه خلال يومين، لأنه "إما أنه يتوجب علي إكماله، أو إضرام النار فيه".

في جوتنجن، عرض هايزنبرج مخطوطا على بورن، أشار فيه إلى أنه لم يثق في حكمه بما يكفي لمعرفة ما إذا كان أهلا للنشر. تحمس بورن مباشرة وأرسل البحث إلى Zeitschrift fur Physik. في ذهن بورن ذي القدرات الرياضية الفائقة، أثار حساب هايزنبرج الغريب، المعبر عنه بأسلوب معيب، مفاجأة، حال اهتياج، بصيص إدراك مراوغ لم يتهيأ في البداية لاقتفاء أثره. أبلغ أينشتين بالنبأ بعد بضعة أيام، محذرا إياه بأنه رغم أن عمل هايزنبرج "بدا جد غامض، فهو لا ريب صحيح وعميق".

ولأنه أفاد من خبرته في كوبنهاجن، انتظر هايزنبرج حتى نهاية أغسطس قبل إبلاغ بور بالنبأ. "ربما أخبرك كرامر بأني اقترفت جريمة كتابة بحث في ميكانيكا الكم"؛ هكذا قال له بطريقة غير مفصلة. كان كرامر مصادفة في جوتنجن لبضعة أيام حين عاد هايزنبرج من هيلجولاند. يتضح أنه تحدث مع هايزنبرج، غير أن كرامر لم ينقل شيئا من هذا الحديث إلى بور. من الممكن جدا أن هايزنبرج، الذي ظل حتى ذلك الوقت غير واثق من أفكاره وحذرا من كرامر، لم يقل لكرامر ما يكفي لإفهامه.

بدأ هايزنبرج بحثه بتصريح جريء: "هي محاولة للحصول على أسس لميكانيكا الكم النظرية تنهض حصريا على العلاقات القائمة بين الكميات القابلة من حيث المبدأ للملاحظة". القابلية للملاحظة: هذا هو المبدأ الواعد في هذه الميكانيكا الجديدة.

انس محاولة تفسير سلوك الإلكترونات مباشرة؛ وعبّر بدلا من ذلك عما تود معرفته بأشياء في وسعك أن تراها ـ الخصائص المطيافية التي تختص بها الذرة.

رغم كل مضامينه الثورية، كان بحث هايزنبرج عرضا مجردا بشكل مثير. إنه لم يتحدث إلا عن أنساق ميكانيكية بسيطة محددة بسبل صورية. ليس هناك أي نقاش لذرات أو إلكترونات فعلية. كان البحث أساسا لميكانيكا الكم، وليس نظرية في ميكانيكا الكم. السؤال ما إذا كان هذا يفضي إلى نظرية فيزيائية أصيلة ظل قائما.

في رسالة بعث بها بعد أسابيع إلى عالم فيزياء آخر ، قال بولي إن فكرة هايزنبرج "منحتي [نفحة جديدة للتمتع] joie de vivre [ببهجة الحياة]، وجعلتني مفعما بالأمل ... لقد أصبح بالإمكان مرة أخرى إحراز تقدم".

حين رأى أينشتين البحث القصير، كان رد فعله مختلفا تماما. لقد كتب مباشرة إلى زميل يقول له "لقد وضع هايزنبرج بيضة كمومية كبيرة. في جوتنجن يعتقدون فيها (أما أنا، فلا)."

لعل هايزنبرج، على حد تعبيره، قد اقترف جريمة حين كتب في ميكانيكا الكم. لم يكن الحكم القضائي قد صدر بعد. وعلى أي حال، لقد استبين بعد ذلك بقليل أنه لم يكن المجرم الوحيد.

الفصل العاشر

روح النسق القديم

في نوفمبر 1924، اجتمع أعضاء هيئة التدريس في كلية العلوم بجامعة باريس للاستماع إلى دفاع عن رسالة دكتوراه. كان المرشح هو لوي دي بروجلي [Louis de Broglie]، البالغ من العمر اثنين وثلاثين عامًا، والذي تأخر في مسيرته العلمية بسبب موروث عائلي أولاً، وبسبب الحرب بعد ذلك. أنجبت أسرة دي بروجلي لفرنسا رجال دولة، وساسة، وضباطًا عسكريين. كان والد لوي عضوًا في البرلمان، وقد درس لوي التاريخ في السربون كي يكون دبلوماسيًا. غير أنه كان لديه أخ يكبره بعدة سنين، اسمه موريس، أصيب بهوس الاهتمام بالأشعة السينية في تسعينيات القرن التاسع عشر، وقرر ضد رغبة أبيه وجده أن يكون عالمًا. ملأ موريس عقل أخيه بالحديث عن الإشعاع والإلكترونات، حتى أقنعه بالتحول إلى دراسة العلم.

خلال الحرب، التحق دي بروجلي الأصغر بوحدة متنقلة للإبراق اللاسلكي، حيث تعلم بشكل مباشر القيمة العملية للنظرية الموجية الكهرومغناطيسية التقليدية. سمع من أخيه عن مفهوم كموم الضوء الخلافي. لم يكن بالكاد العالم الوحيد الذي أدرك التعارض البادي بين هاتين الرؤيتين في الضوء، غير أنه قارب الإشكالية من منظور لم يخطر على بال أحد.

في نهاية عام 1923، عنّت له فكرة أولية. إذا كان بمقدور الضوء، في صورة كمومات أينشتين، أن يسلك بطرق تجعله شبيهًا، على المستوى المفهومي على أقل تقدير، بتيار من الجسيمات، ألا يمكن أيضًا أن تعرض الجسيمات بعض خصائص الموجات؟

في عجالة، أعدّ بروجلي حجة بديلة لكنها بارعة جمعت بين قاعدة بلانك الكمومية للإشعاع ومعادلة أينشتين الشهيرة E = mc2 المتعلقة بالأجسام المتحركة، وقد مكنته هذه الحجة من تأمين تصور متسق منطقيًا يقيم علاقة بين طول الموجة وأي جسيم يتحرك بسرعة. كلما كان الجسيم أسرع، كانت طول الموجة أقصر.

ولكن هل كان هذا أي شيء أكثر من مجرد صيغة جبرية؟ هل ينبئ الطول الموجي حقيقة بأي سلوك شبيه بالموجة؟ ولأنه لم يكن مثقلاً بأي فهم معمق لنظرية الكم، طبق دي بروجلي فكرته على ذرة بور التي عفا عنها الزمن، وعثر على نتيجة لافتة. وفق حساباته، في الإلكترون الذي يدور حول نواة في الفلك الأدنى، يتساوى طول الموجة مع محيط الفلك. وقد اكتشف أن محيط الإلكترون الذي يدور في الفلك التالي - والذي تكون طاقته أعلى ونصف قطره أكبر - يساوي ضعف طول موجة الإلكترون، فيما يساوي حالة دورانه في الفلك الثالث ثلاثة أضعاف الطول الموجي، وهكذا، وفق تقدم بسيط.

تمامًا كما أن النوتة الأساسية وتناغمات وتر الكمان تطابق التذبذبات التي لها عدد صحيح يناسب طول الوتر، فإن للأفلاك المتاحة لذرة بور عددًا صحيحًا من أطوال الإلكترون الموجية يناسب محيط الفلك. لعل المكمومية لم تعد في نهاية المطاف أكثر غموضًا من فيزياء الأوتار المذبذبة.

نشر دي بروجلي فكرته في بحثين ظهرًا في نهاية عام 1923. غير أنهما لم يثيرا اهتمامًا كبيرًا. بعد سنة، حين عرض صيغة أكمل في دفاعه عن رسالته، كان هناك رد فعل حذر. لقد وجد ممتحنوه أن فكرة الموجات الإلكترونية تمعن في البساطة، كما أنها خيالية أكثر مما يجب. لم يستطيعوا التشكيك في فكرته الجبرية؛ غير أنهم لم يستطيعوا أن يقرروا ما إذا كانت تعني أي شيء فيزيائي. على ذلك، أرسل أحد الممتحنين نسخة من عمل دي بروجلي إلى أينشتين، المغرم بالأفكار البسيطة ذات المضامين الهائلة. كان حكمه واضحًا. لقد قال إن الضباب قد بدأ ينقشع.

غير أنه لا أحد غيره حفل بالأمر.

لأنه ولد عام 1892، كان دي بروجلي أكبر بعقد من بولي ومن المغامرين الشبان الآخرين الذين كان يستحدثون Knabenpysik - فيزياء الغلمان - في جوتنجن وفي أماكن أخرى. أكبر سنًا منه أيضًا كان إرفين شرودنجر [Erwin Schrodinger]، المولود في فينا عام 1887، لأسرة غنية متحررة أخلاقيًا بطريقة ما، ذات أسلاف إنجليز ونمساويين. كان إرفين وحيد أبيه، وقد عاش في شقة فاخرة في وسط فينا. لم تكن أسرة شرودنجر تتذوق الموسيقى كثيرًا، لكنها كانت مغرمة بالمسرح الإباحي في فينا نهاية القرن التاسع عشر. أشرفت على تربيته نساء - أمه الرقيقة وأختاها. حتى فترة المدرسة الثانوية، عرف بسجاياه الواثقة، الآسرة، والملتبسة بعض الشيء، بقدر ما عرق بقدراته الذهنية الواضحة.

التحق شرودنجر بجامعة فينا، في خريف 1906، بعد أسابيع من انتحار بولزمان. بعد ذلك، خلال الحرب، شهد معارك وفاز بميدالية. أكثر مدرّسيه تأثيرًا فيه، فرتز هازنوهرل [Fritz Hasenohrl]، مات في معركة، وقد كان موته أحد الأسباب الرئيسة التي جعلت بولي يغادر مدينته للدراسة في ميونخ. بعد أن استمتع ببعض التجارب العاطفية في عشرينياته، تزوج عام 1920 امرأة أحبته وعنيت به. أصبح يعتمد عليها، بديلاً للنساء اللائي أشرفن على تربيته، غير أنه لم ير مبررًا لأن يعوق الزواج غرائزه. في النهاية رزق بثلاثة أطفال من ثلاث نساء مختلفات، لم تكن المرأة التي تزوج واحدة منهن.

في عام 1921 قبل شرودنجر منصبًا مريحًا في زيورخ؛ حيث كانت الحياة أسهل بكثير من فينا بعد الحرب. بحلول ذلك الوقت، كان نشر أعمالاً في نظرية الإلكترونات، والخصائص الذرية للمعادن الصلبة، والأشعة الكونية، وانتشار الضوء، والحركة البراونية، وفي النسبية العامة - وقد كانت كل هذه الأعمال تؤخذ بعين الاعتبار، ولكن ولا واحدة منها تحوز أهمية في علم المطيافية. ورغم أنه عني بمشاكل معاصرة، فإن شرودنجر يعد تقليديًا على نحو ما. نفر من فكرة أن الإلكترونات، في ذرة بور—

سمرفيلد، تقفز بشكل مفاجئ من فلك إلى آخر. لقد قدّر أن هذا النوع من عدم الاتصال لا ينتمي إلى الفيزياء ـ كما شكا أينشتين ـ وأنه يجلب معه درجة كبيرة من عدم القابلية للتنبؤ، وأشياء تحدث دون أسباب يمكن تمييزها.

ما أن بدأت الأخبار تتسرب حول إعادة تأويل بروجلي لأفلاك الإلكترونات بوصفها موجات مستقرة، حتى لاحظ شرودنجر أن نتيجة نظرية كان خلص إليها، نشرت قبل عام أو عامين، ألمحت بطريقة مبهمة إلى الشيء نفسه. في حين لم يكن دي بروجلي متمرسًا في الأمور النظرية، كان شرودنجر يتقن بطريقة بارعة الأساليب الرياضية. تعلق بمخطط نظرية دي بروجلي البدهي وقد استحوذت عليه فكرة أنه يتوجب أن يكون بالمقدور استخلاص نظرية حقيقية منه.

في منتصف عام 1925، حين كان هايزنبرج في القاعدة الحربية الصخرية في بحر الشمال يؤلف نظريته الجديدة والغريبة في حساب التفاضل والتكامل، كتب شرودنجر بحثًا موسعًا في موجات دي بروجلي الإلكترونية، ألمح فيه إلى اقتراح مؤداه أن الجسيمات ليست جسيمات حقيقة إطلاقًا، وعلى حد تعبيره، فإنها عبارة عن "طبقات زبدية" لمجال موجي مؤسس. ناسب هذا رؤية شرودنجر في العالم المادي. ما أن تقبل فكرة الجسيمات، حزم عينية من الطاقة، حتى يستحيل تجنب التقطع، والتلقائية، وكل مثل هذه الاختلالات. ولكن إذا كان ما نحسبه جسيمات تجليًا سطحيًا لموجات ومجالات مؤسسة، فقد يكون في وسعنا استعادة الاتصال.

عندما كان شرودنجر يتحدث باستمرار عن غرائب موجات دي بروجلي، تحداه زميل مرتاب من زيورخ. إذا كانت هذه الموجات، بمعنى ما، موجات المستقبل، فأين المعادلة [التي تحكم سلوكها] ؟ إن مبلغ ما تقوم به حجة دي بروجلي هو أنها تربط بين طول موجي بإلكترون يتحرك بسرعة بعينها. إنها لا تقول شيئًا عن ماهية هذه الموجات، ولا عما يحدد شكلها، أو دلالتها الفيزيائية، هذا إذا كانت لها دلالة أصلاً. نسبة إلى كل الحركات الموجية الكلاسيكية المحترمة، الموجات الكهرومغناطيسية، موجات المحيطات، الموجات الصوتية ـ تربط المعادلة الرياضية الشيء الذي يتذبذب

بالقوة أو التأثير الذي يجعله يتذبذب. غير أنه ليس هناك أي شيء من هذا القبيل في حالة موجات دي بروجلي. الحال أنها لم تكن آنذاك موجات حقيقية قدر ما كانت فكرة تم عتقها أو تجريدها من فكرة الحركة الموجية.

خلال عطلة عيد الميلاد من عام 1925، حرر شرودنجر نفسه من زوجته وأمضى بعض الأيام في منتجع قرب دافوس، في سويسرا، صحبة خليلة لم يحفظ التاريخ اسمها. وأثناء ما وصفه لاحقًا أحد علماء الفيزياء بحالة "هيجان شهواني متأخر في حياته"، وجد شرودنجر (الذي كان اقترب من الأربعين) ما كان يبحث عنه ـ معادلة موجية تستوعب حدس دي بروجلي بطريقة صورية. (في واقع الأمر، كانت تلك واحدة من حالات الهيجاني الشهواني التي حفلت بها حياة شرودنجر، رغم أنها الوحيدة التي أنتجت فيزياء عظيمة).

وصفت معادلة شرودنجر مجالاً يحكمه عامل رياضي يتجلى فيه نوع دالة الطاقة. حين تطبق على الذرة، تفضي المعادلة إلى عدد محدود من الحلول في شكل أنماط مجالية ساكنة، يمثل كل منها وضع الذرة في طاقة مثبتة ما. كانت المكمومية تأتي بطريقة بدت كلاسيكية على نحو مرض. للحصول على تمثيلات لأوضاع الذرة، اشترط شرودنجر، على طريقة الرياضيين، أن يصل الحل إلى الصفر في المسافات الطويلة ـ خلافًا لذلك لن يطابق شيئًا يشغل حيزًا. وفق هذا الشرط، لا تفضي معادلته إلا إلى فئة متناهية من التشكيلات المستقرة، يحوز كل منها قدرًا متميزًا من الطاقة. لقد قدّر أن هذا ليس أكثر غموضًا من الحصول على فئة متناهية من التذبذبات لوتر كمان مثبت من طرفيه في موضع ما.

أفضل من ذلك، ألمح شرودنجر في أحد أبحاثه العديدة التي نشرت عام 1926 إلى أنه أصبح الآن بالإمكان فهم القفزة الكمومية، التحول من وضع إلى آخر، لا على أنه تغير مفاجئ وغير متصل بل على أنه تحول انسيابي من نمط موجي ساكن إلى آخر؛ حيث تعيد الموجة تشكيل نفسها بسرعة ولكن بطريقة سلسلة.

ابتهج الحرس القديم. كتب أينشتين رسالة إلى شرودنجر متحمسًا، ذيّلها بقوله "إن مفهوم بحثك ينبئ بعبقرية حقيقية". أسرع أينشتين وبلانك إلى استضافة شرودنجر إلى برلين. كتب أينشتين ثانية إلى شرودنجر، قائلاً له "إنني مقتنع بأنك أنجزت تقدمًا حاسمًا ... قدر ما كنت مقتنعًا بأن طريقة هايزنبرج – بورن كانت تسير في الاتجاه الخطأ." لقد استعيد النظام الكلاسيكي فجأة، أو هكذا بدا في تلك الآونة.

في المقابل كان ما وصفه أينشتين بطريقة هايزنبرج – بورن نسقًا رياضيًا غريبًا، ومعقدًا، ووعرًا، نتج في عجالة عن إلهام هايزنبرج في هيلجولاند. في 19 يوليو، كان ماكس بورن، الذي ظل حتى ذلك الوقت يحاول التعامل مع ومضة الألفة التي أثارها حساب هايزنبرج الغريب، يستقل القطار إلى هامبورج لحضور اجتماع عقدته "الجمعية الفيزيائية الألمانية". وما أن جلس في مقصورته يقرأ ويدوّن، حتى شرع يلحظ أن ما كان هايزنبرج يقوم به بطريقته المرتجلة إنما ينتمي إلى فرع ملغز من فروع الرياضيات عرف باسم جبر المصفوفات. لقد تذكر بورن أنه تعلم شيئًا عنه منذ سنوات، حين كان ما زال يرغب في أن يكون عالم رياضيات بحتة. وحتى ذلك الحين لم ير منها نفعًا عمليًا.

المصفوفة مجموعة أعداد توضع في صفوف وأعمدة. جبر المصفوفات قواعد حسابية لتجميع ومداولة المصفوفات بطريقة منتظمة. يمكن تدوين عناصر حسابات هايزنبرج على نحو مماثل، فيما أصبح بورن يرى الآن، في شكل مجموعة مربعة؛ حيث يشير كل موضع في المجموعة إلى تحول من وضع ذري ما إلى وضع آخر. الأمر الحاسم هو أن قاعدة الضرب التي كدّ هايزنبرج في استحداثها كانت هي على وجه الضبط قاعدة الضرب الخاصة بالمصفوفات المعروفة أصلاً لنخبة منتقاة من الرياضيين. وبطبيعة الحال، لم يكن هايزنبرج يعرف أي شيء من هذا القبيل. لقد كان تبصره الثاقب في الفيزياء الرياضية هو الذي قاده إلى الإجابة التي يريد.

لاحظ بورن الآن أن فرعًا بأسره من الرياضيات موجود أصلاً، مفصل بالمقاس لميكانيكا الكم. في محطة ما، استقل بولي، الذي كان قادمًا من هامبورج، القطار

نفسه، فوجد بورن مستثارًا باكتشافه ومتلهفًا لشرح ما أصبح يفهمه الآن. غير أن بولي لم يحجم فحسب عن إبداء إعجابه، بل سخر بطريقة لاذعة. "أعلم أنك مولع بالشكلانية [الصورانية] المملة والمعقدة"، فيما يذكر بورن أنه قال، [غير أنك] "لن تنجح إلا في إفساد أفكار هايزنبرج الفيزيائية بنظرياتك الرياضية غير المجدية". هكذا استقبل العالم الفرع الذي سوف يعرف عما قليل بميكانيكا المصفوفات.

غير أن بور لم يدع سخرية تلميذه السابق تثبط من عزيمته. هناك في جوتنجن، أعد صحبة مساعده باسكوال جوردن [Pascual Jordan] تصورًا كاملاً في نسق هايزنبرج في اللغة الصورية لجبر المصفوفات. بعد ذلك قام هايزنبرج، العائد من رحلة من كيمبردج ومن نزهة نقاهة مع رفاقه من جماعة Pfadfinder انضم إلى بورن وجوردان فيما أصبح يعرف بـ Dreimanner–arbeit ـ بحث الرجال الثلاثة ـ الذي واصل تنقيح ميكانيكا المصفوفات وتوسيعها. ورغم أن هايزنبرج قد شعر بالامتنان من كون حدسه الفيزيائي قد أجدى له نفعًا، أحس بوخزة ألم من ريبة صديقه بولي. لم تعجبه تسمية "ميكانيكا المصفوفات"، التي وجدها موحية بالرياضيات البحتة، وبنوع لا يألفه علماء الفيزياء وقد يحيد بهم عن الطريق.

ثمة جدل ساخن تجذر هنا. كان بورن طيلة حياته يغذي مشاعره بالامتعاض بسبب التقليل من شأن إسهاماته وإسهامات جوردن في ميكانيكا الكم والتغاضي عنها. لقد سلم بأن "هايزنبرج كان غاية في البراعة" حين ابتكر جبر المصفوفات دون أن يعرف ما هو، غير أنه بدا في الوقت نفسه عاجزًا عن فهم حجم القفزة المفهومية التي قام بها هايزنبرج. إنها لا تستحق أن توصف بالنظرية، فيما اعتقد، إلا بعد أن قام صحبة جوردن بكسو عظام الفكرة لحمًا عبر إعمال الإحكام الرياضي اللازم. هكذا كان دأب بورن. لأنه لم يكن ينعم بموهبة التبصر الفيزيائي، لم يكن يقدّر قيمة الحدس العلمي الذي ينعم به آخرون. يبدو أن قوله إن "هايزنبرج كان غاية في البراعة" يضمّن أن زميله الأصغر سنًا كان مجرد عالم أبله ضربته صاعقة [عثر مصادفة على فكرة عظيمة].

ومهما يكن من أمر، لم تحظ ميكانيكا المصفوفات بالترحيب في أوساط علماء الفيزياء. لقد تعين عليهم أن يتعلموا فرعًا جديدًا في الرياضيات، وأن يجهدوا فضلاً عن ذلك في فهم ما تمثله المصفوفات فيزيائيًا. كانت ميكانيكا الكم، في إزار جبر المصفوفات، معقدة إلى حد مروع. في الوقت نفسه بدت إلى حد كبير إنجازًا صوريًا. لقد زعم علماء الفيزياء الرياضية أنها سليمة منطقيًا، وأنها استوعبت بشكل رائع القضايا المحيرة التي ابتليت بها نظرية الكم. كل هذا جيد؛ ولكن ما الذي نستطيع أن نفعله بها؟

استمرت حالة اختلاط المشاعر التي انتابت بولي. بعد ظهور بحث بورن – جوردن، كتب إلى زميل يقول "تتعين المهمة التالية في إنقاذ ميكانيكا هايزنبرج من التمادي في الوقوع ضحية لعلموية جوتنجن الصورية وفي الكشف بطريقة أوضح عن جوهرها الفيزيائي". في فترة ما، نفد صبر هايزنبرج إزاء موقف بولي المرير، فكتب إليه غاضبًا يقول "إن تذمرك الذي لا ينتهي من كوبنهاجن وجوتنجن مخز تمامًا. لا ريب أنك تدرك أننا لا نحاول تدمير الفيزياء. إذا كنت تشكو من غبائنا لأننا لم نأت بجديد في الفيزياء، فقد تكون محقًا. غير أنك وفق هذا لا تقل عنا غباء، فحتى أنت لم تأت بجديد".

تألم بولي من هذا القول، فشرع في العمل، وفي أقل من شهر استطاع استخدام ميكانيكا المصفوفات بكل عظمتها في اشتقاق سلسلة بالمر في خطوط الهيدروجين المطيافية ـ الشيء نفسه الذي قام به بور قبل عدة سنوات باستخدام نموذجه البسيط. كانت حسابات بولي عملاً يكشف عن براعته، برهنة قوية ومقنعة على أن ميكانيكا المصفوفات لم تكن مجرد صورية رياضية. هكذا كتب هايزنبرج مهدئًا من روعه، "لست في حاجة لأن أقول لك إلى أي حد أبهجتني نظرية الهيدروجين الجديدة، وإلى أي حد أدهشتني السرعة التي أنجزتها بها".

من منحى آخر، لم يكن إثبات بولي سهلاً. لقد ظلت الصعوبة الرياضية ترهب معظم الفيزيائيين، والزعم بعمق بميكانيكا المصفوفات الفكري لا يعني شيئًا إذا ظل المرء عاجزًا عن متابعة الاستدلال.

حدث المزيد من الارتباك في نوفمبر 1925 بسبب بحث أنيق كتبه بول ديراك [Paul Dirac]، وهو عالم فيزياء صغير في كيمبردج. يبدو أن ديراك لم يقابل هايزنبرج في زيارته الأخيرة إلى كيمبردج، لكنه اطلع على بحث أبقاه هناك. استوعب ديراك تبصر هايزنبرج وخرج بتصوره الرياضي المحكم لميكانيكا الكم، الشبيه بما أعده بورن وجوردن، وإن اختلفت أسسه. تعمق ديراك في ركن معتم من أركان الميكانيكا الكلاسيكية كي يجد عاملاً تفاضليًا يظل يمتثل لقاعدة الضرب التي استحدثها هايزنبرج. كانت هناك عناصر شبه مصفوفية في حساب ديراك، ولكن بطريقة ثانوية.

يبدو أن هناك تناسبًا يؤلف بين كل ذلك. غير أنه من المربك كثيرًا أن يكون بالإمكان تشكيل ميكانيكا الكم وفق نسقين رياضيين مختلفين وإن ظلا مرتبطين. وبطبيعة الحال، كان العلماء في جوتنجن يفضلون المصفوفات؛ غير أن تحليل ديراك الأنيق، الذي ثبت أنه أكثر قدرة، حظي بالموافقة في كوبنهاجن.

في الأثناء، كان علماء الفيزياء خارج هذه الأوساط النخبوية يتساءلون عما إذا كان هناك من هو قادر على إنتاج صيغة لميكانيكا الكم بمقدورهم فهمها. هذا سبب الاحتفاء العظيم الذي استقبلت به معادلة شرودنجر الموجية، حين ظهرت في بداية عام 1926. لقد كانت خالية تمامًا من الجبر، وتستخدم معادلة جبرية من النوع المألوف لدى العلماء. ولأنه لم يجد شرودنجر في نفسه حرجًا من الإعلان عن موقفه من ميكانيكا المصفوفات، كتب يقول "لقد خفت إن لم أكن صددت بسبب مناهجها الجبرية المتعالية، التي بدت لي صعبة جدًا".

استشعر سمرفيلد هو الآخر النفع الذي يمكن أن تقدمه المعادلة الموجية. لقد اعتقد أن ميكانيكا المصفوفات "جد معقدة ومجردة على نحو مخيف. لقد جاء شرودنجر الآن كي ينقذنا".

غير أن أجندة شرودنجر كانت أكبر من ذلك. لم يرد فحسب الترويج لصيغة أسهل من ميكانيكا الكم بل إصلاح العطب الذي أحدثته في المحاضرة التي ألقاها بمناسبة تسلمه جائزة نوبل عام 1933، تحدث شرودنجر عن كيف أن شاغله الأكبر، حين كان يجهد في استحداث معادلته الموجية، قد تعين أساسًا في إنقاذ "روح نسق الميكانيكا القديم".

أصر شرودنجر على أن الجسيم ليس كرة بليارد صغيرة بل حزمة من الموجات المجمعة بإحكام يخلق الوهم بشيء منفصل. في النهاية، يختزل كل شيء في موجات. سوف تكون هناك متصلة تحتية، لا انقطاع فيها، ولن تكون هناك أية كينونات منفصلة. لن تكون هناك قفزات كمومية، بل تحولات سلسة من وضع إلى آخر.

لم يلزم شيء من هذا مباشرة عن معادلة شرودنجر، بل هذا ما أمل شرودنجر أن تفضي إليه. في يوليو من عام 1926 ألقى محاضرة في ميونخ في رؤيته الموجية لميكانيكا الكم. كان هايزنبرج في ميونخ، بعد أن أتى من كوبنهاجن لزيارة والديه والاستماع إلى شرودنجر شخصيًا. ثمّن النفع العملي الذي تقدمه ميكانيكا الموجات، كيف أنها جعلت الحسابات البسيطة ممكنة. غير أنه لم ترق له أحكام شرودنجر الأوسع، وقد وقف من بين الحاضرين ليفصح عن بعض الاعتراضات. لقد تساءل، إذا أردنا للفيزياء أن تصبح ثانية متصلة كلية، فكيف نفسر الأثر الكهرو – ضوئي أو التناثر الضوئي عند كومبتون اللتين اعتبرتا آنذاك شواهد تجريبية مباشرة على أن الضوء يأتي في صورة حزم منفصلة يمكن تحديدها.

أثار هذا التساؤل استجابة متهيجة من ويلي فين، الذي لا شك أنه ظل يعتز بذكريات حميمية لأداء هايزنبرج الرديء في دفاعه عن أطروحته قبل بثلاث سنوات.

وفيما يذكر هايزنبرج، تدخل فين قبل أن يتمكن شرودنجر من التكلم قائلاً "بينما فهم شرودنجر أسفي على أن ميكانيكا الكم قد انتهت، وانتهى معها كل ذلك الهراء عن القفزات الكمومية، إلخ، لا شك في أنه سوف يتمكن من حل الصعوبات التي ذكرت في المستقبل القريب".

بعد سماعه شرودنجر، بدأت الشكوك تساور سمرفيلد. لقد كتب إلى بولي بعيد ذلك يقول "إن انطباعي العام هو أن الميكانيكا الموجية بلا ريب ميكانيكا مجهرية جديرة بالإعجاب، لكن هذا لا يقترب من حل الأحجية الكمومية الأساسية".

لم يكن اعتراض هايزنبرج على ميكانيكا الكم مجرد اعتراض فني، فهو لم يوافق أصلاً على أسلوبها. في صياغة المفهوم الكامن وراء ميكانيكا المصفوفات، جعل هايزنبرج صراحة العناصر الملاحظية ـ تردد التحولات الذرية وقوتها ـ تقوم بدور مركزي، في حين ظلت حركة الإلكترونات الفردية غير المحسوسة خلف الشاشة. لقد كان القصد من موجات شرودنجر استعادة المنظور القديم. الجسيمات، حسب شرودنجر، مجرد تجليات للموجات التحتية، ولكن في حين أن هذه الموجات كانت أساسية، فإن الجسيمات فيما يبدو لم تكن قابلة للكشف بطريقة مباشرة. إن ميكانيكا الموجات تعلي من كمية محجوبة إلى منزلة أولوية نظرية، وهذه ليست السبيل الصحيحة، وفق ما تيقن هايزنبرج، لتشكيل ميكانيكا الكم.

كانت بساطة موجات شرودنجر الظاهرية مضللة إلى حد بعيد، فيما اعتقد هايزنبرج، وعلماء الفيزياء إنما يخدعون أنفسهم إذا حسبوا أن أسلوب شرودنجر يشكل استعادة لقيم كلاسيكية. غير أنه لم يمض وقت طويل حتى استبين أن شكوكه صحيحة.

الفصل الحادي عشر

أميل إلى التخلي عن الحتمية

أنتجت جوتنجن ميكانيكا المصفوفات. أما ميكانيكا الموجات فقد جاءت من زيورخ. ثمة أصوات أخرى كانت تترى من كوبنهاجن وكيمبردج. في الأثناء، كان ألبرت أينشتين وماكس بلانك يرقبان المشهد من عليائهما الأولمبي [برجهما العاجي] في برلين. كان أينشتين قد أوشك على بلوغ الخمسين، فيما كاد بلانك يبلغ السبعين. لقد أصبحا آنذاك شخصيتين محافظتين أساسًا. طالما بقي هناك خلط حول نمطي ميكانيكا الكم الرياضيين المتناقضين ظاهريًا، وغموض مصاحب بخصوص الأهمية الفيزيائية التي تحظى بها النظرية، ظل في وسع كليهما أن يتشبث بأمل أن يلوح في الأفق شيء أقرب إلى روح الفكر الكلاسيكي.

ثمة جانب من الخلط تبدد بسهولة وسرعة مفاجئتين. في ربيع 1926، اكتشف شرودنجر أن ميكانيكا الموجات وميكانيكا المصفوفات ليستا في نهاية المطاف مختلفين بشكل أساسي. رغم ما يبدوان عليه من تناقض ظاهر، كانتا في واقع الأمر النظرية نفسها ترتدي زيين رياضيين مختلفين بشكل لافت. باختصار، يمكن استخدام موجات شرودنجر في حساب أعداد تمتثل لجبر المصفوفات، قدر ما يمكن جعل جبر المصفوفات، حين يطبق على الكميات المناسبة، قادرًا على أن يسلم إلى معادلة شرودنجر. لم يكن شرودنجر وحيدًا في اكتشاف هذا التكافؤ المدهش. لقد أثبته بولي هو الآخر، في رسالة بعث بها إلى جوردن، رغم أن الإثبات لم يرض فيما يبدو معياره

الصارم في القابلية للنشر، وبعد ذلك بقليل، ظهرت الحجة نفسها في Physical Review، في بحث كتبه كارل إيكارت [Carl Eckart]، وهو منظّر ألماني – أمريكي من مؤسسة فتية واعدة تسمي نفسها معهد كاليفورنيا للتقنية [California Institute of Technology].

غير أن هذه البراهين على التكافؤ الرياضي بين تنويعتين من ميكانيكا الكم لم تنجح إلا في تعسير مهمة فهم كيف يتسنى لمثل هذين الوصفين للفيزياء أن ينتجا عن المصدر نفسه. ظل علماء الفيزياء يجدون موجات شرودنجر مألوفة على نحو مريح، فيما بقيت ميكانيكا المصفوفات غريبة على نحو غامض. هل ثمة سبيل أفضل للحديث عن الفيزياء، أم أن المسألة ذوقية وترتهن باعتبارات عملية؟

ولأنهما كانا يتطلعان إلى مواكبة الدراما المتطورة، استضاف أينشتين وبلانك الممثلين الرئيسين إلى برلين. وصل هايزنبرج أولاً لما وصفه بـ "معقل الفيزياء الرئيس في ألمانيا"، رغم أنه عرف بلا ريب أنه فيما يتعلق بميكانيكا الكم، ازدهرت الأقاليم على حساب العاصمة. لم يبد أن محاضرته التي ألقاها على أساتذة برلين المتميزين قد علقت بوجه خاص في ذهن هايزنبرج؛ بل كانت أولى محادثاته البحثية مع أينشتين أعلق بالذاكرة. لقد أمّل في أن يرى ذلك الرجل العظيم قبل أربع سنوات في لبزج، غير أن أينشتين قاطع الاجتماع بعد اغتيال وزير الخارجية راثنو، فيما هرب هايزنبرج عقب السطو عليه. لكن هايزنبرج آنذاك لم يكن قد بلغ من العمر سوى إحدى وعشرين سنة، وكان خجولاً بعض الشيء، يناضل مع مسألة نصف الكم المشكوك في أمرها. بعد أربع سنوات، ظل أينشتين هو أينشتين، وقد قطع شوطًا طويلاً في طريق إصباحه الرجل الأشعث ذا الأسمال الرثة، الشخصية الشعبية الأسطورية، في حين أن هايزنبرج لم يعد الشخص نفسه، إذ أصبحت له مواقفه وآراؤه الخاصة في جدله مع سمرفيلد، وبولي، وبور. لقد عثر على مفتاح ميكانيكا الكم. في مظهره، بدا أنه الشخصية المميزة والمتواضعة التي عرف بها دائمًا (كان يبدو مثل قروي، كما لاحظ بورن أول ما رآه في جوتنجن؛ مثل صبي النجار، وفق ما علق أحدهم في

كوبنهاجن)، لكن قدر ثقته في نفسه تعاظم. في ميكانيكا الكم، كان هو الخبير، فيما لعب أينشتين دور الناقد.

بعد المحاضرة، مشى الاثنان في الشوارع في طريقهما إلى بيت أينشتين، يتجادلان كرًا وفرًا. اعترض أينشتين بحدة على غموض ميكانيكا المصفوفات، على الطريقة التي أرسلت بها الوضع والسرعة إلى المناطق الخلفية من المشهد وجلبت إلى مقدمته كميات رياضية غامضة، غير مألوفة، وعويصة. احتج هايزنبرج بأنه اضطر إلى هذه التطورات الغريبة لأنه كان يحاول تشييد نظرية فيما يستطيع علماء الفيزياء أن يلحظوه فعلاً بخصوص الذرة، وليس في دينامياتها الداخلية غير المعروفة وربما حتى غير القابلة للمعرفة. وعلى أي حال، فيما تساءل هايزنبرج، أليست هذه هي الأسس الاستراتيجية نفسها التي استخدمها أينشتين بنجاح باهر قبل سنين، حين خلص إلى النسبية الخاصة؟

لم يكن بمقدور أينشتين سوى أن يرد متذمرًا بقوله، وفق رواية هايزنبرج للقصة، "لعلني استخدمت نوع الاستدلال نفسه .. لكن هذا لا يغير من حقيقة أنه هراء".

في استحداثه النسبية، أعاد أينشتين ابتكار المكان والزمان. لقد بدأ بالتدقيق في معنى التزامن. في ميكانيكا نيوتن، كان الزمان مطلقًا. إذا وقع حادثان في مكانين مختلفين في الوقت نفسه، فإن حدوثهما المتزامن حقيقة موضوعية، معطى أكيد. غير أنه كان لدى أينشتين ما يكفي من الفطنة لجعله يتساءل كيف يتسنى لملاحظي هذين الحادثين أن يعرفا أنهما وقعا في الوقت نفسه. سوف يتعين عليهما أن يوقّتا ساعتيهما، على حد تعبير شخصيات أفلام الحرب. هذا يعني تبادل الإشارات - باستخدام ومضات من الضوء، أو الحديث عبر أجهزة الراديو. غير أن هذه الإشارات تنتقل في أفضل الأحوال بسرعة الضوء، وعبر تتبع دقيق لكيف يتسنى لملاحظين مختلفين تحديد أزمنة الحوادث وأماكنها، بيّن أينشتين أنه لن يتسنى لهما بوجه عام الاتفاق على

التزامن. الحادثان اللذان وقعا وفق أحد الملاحظين في الوقت نفسه، سوف يعتبرهما ملاحظ آخر قد وقعا في زمنين متعاقبين.

وعلى النحو نفسه إلى حد كبير، فيما أكد هايزنبرج، لا نفع من تخيل أنك تستطيع تشكيل رؤية مطلقة شاملة داخل الذرة. كل ما تستطيعه هو أن تلاحظ بطرق مختلفة سلوك الذرة ـ الضوء الذي امتصت والضوء الذي أصدرت ـ وأن تستنج بأفضل ما تستطيع ما يحدث في الداخل.

لم يقتنع أينشتين بذلك. في النسبية، رغم أن الملاحظين قد يكونون مختلفين، تظل الحوادث تحتفظ بمادية منفصلة وأكيدة. بمقدور جمع من الملاحظين الذين يقارنون بين تقاريرهم الملاحظية الوصول إلى إجماع مقبول للجميع على كل ما سبقت لهم رؤيتهم، لأن النسبية الخاصة تفسر التعارض بين قصصهم الفردية. ثمة موضوعية تحتية تظل باقية.

هذا، حسب أينشتين، يختلف تمامًا عن حالة ميكانيكا الكم. لقد اعتقد أن هايزنبرج يقول فيما يبدو إنه من الحمق أن نطلب تصورًا متسقًا لبنية الذرة وسلوكها. لقد بدا له أن ميكانيكا المصفوفات بوجه خاص تستبعد بطريقة تسلطية الأسئلة المتعلقة بنزوعات الإلكترون التي اعتاد علماء الفيزياء على إعطاء أنفسهم الحق في إثارتها، فيما أيقن أينشتين أنه يظل من حقهم الاستمرار في إثارتها.

رد هايزنبرج على ذلك. لقد كانت النسبية خلافية لأنها قوضت الأسئلة القديمة التي دأب علماء الفيزياء على طرحها عن المكان والزمان، وأرغمتهم على طرح أسئلة جديدة. هذا لا يعني أن المكان أو الزمان قد فقد معناه. لقد حاول هو وزملاؤه القيام

بالشيء نفسه بخصوص الذرة ـ معرفة الأسئلة التي يتعين طرحها. صحيح أن صنوفًا قديمة من المعرفة سوف تضيع، غير أن صنوفًا جديدة سوف تحل محلها.

على ذلك، يتعين عليه أن يعترف بأنه لم ينه مهمته. لقد ظلت ميكانيكا الكم حتى ذلك الحين عملاً في طور التشكل. في النهاية، توقفت المحادثة دون حسم المسألة.

في المقابل، بدا لأينشتين أن ميكانيكا الموجات التي يقول بها شرودنجر واعدة. تخبرنا صورة الموجة المستقرة للإلكترون الموجود في الذرة عن شيء محسوس. بعيد لقائه مع هايزنبرج، كتب أينشتين لسمرفيلد يقول "من المحاولات الراهنة للحصول على صياغة أعمق لقوانين الكم، أفضّل محاولة شرودنجر ... ليس في وسعي سوى أن أعجب بنظريات هايزنبرج – ديراك، لكن رائحة الواقعية لا تنبعث منها".

بحلول ذلك الوقت كان شرودنجر هو الآخر قد زار برلين. وجده أينتشين ودودًا أفضل ما يكون الود. كان شرودنجر فينّيا، متحضرًا، ودافئًا، وحاذقًا. كان كلاهما متزوجًا، لأنه أحب أن يكون هناك شخص يعتني بأمره، غير أن كليهما وجد ملذاته في مكان آخر وأقنع نفسه بأن زوجته ترضى بذلك عن طيب خاطر. ورغم أن أينشتين أمضى سنينًا في برلين، لم يشعر إطلاقًا بأنه في موطنه بين "البروسيين الشقر الفاترين". كان هايزنبرج بحكم مولده ألمانيًا جنوبيًا، من بافاريا، لكن أسرته كانت شمالية ثقافة وسلوكًا. كان يميل إلى الرسميات والسلوك المهذب، ما اعتبره أينشتين تصلبًا وتحفظًا مسرفًا فيه. في المقابل، كان شرودنجر رجلاً بمقدور أينشتين أن يتآلف معه.

غير أن هذا التجانس الروحي لم يحل دون رؤية أينشتين اختلالات في طموحات شرودنجر للفيزياء. في محاضرة ألقاها في برلين، فصّل شرودنجر في آماله في أن يتضح أن موجات معادلته صورة صحيحة للإلكترونات وكينونات أخرى ـ ليست جسيمات

بوصفها كذلك؛ بل تركيزات طاقة وشحنة في المكان. كان أينشتين متعاطفًا لكن الشكوك بدأت تساوره. يتضح أن شرونجر كان يعبّر عن أمنية، وليس عن حجة يمكن البرهنة عليها. قد يكون مجرد تفكير رغبوي، أو هكذا كان في وسع أينتشين أن يقول بسهولة.

[4] عبّر هايزنبرج عن هذا بطريقة أكثر قسوة. لقد كتب إلى بولي يقول "كلما أمعنت التفكير فيها وجدتها أكثر مدعاة للنفور .. في تقديري أنه لا جدوى منها.. فلتتغاض عن هذه الهرطقة ولا تتحدث عنها أكثر من ذلك".

نشر شرودنجر حجة موجزة لدعم تأويله، وضح فيها أن الشكل الموجي الذي يناظر جسيمًا يبحر عبر مكان خاو، سوف يلتحم ببعضه باستمرار. إن هذه السلامة الفيزيائية، فيما جادل شرودنجر، تجعل الموجة المتراصة بديلاً مقبولاً للجسيم التقليدي.

غير أن هذه النتيجة لم تشكل القاعدة بل الاستثناء. استخدم ماكس بورن ميكانيكا الموجات للتفكر في مسألة أكثر تعقيدًا، حالة الصدام بين جسيمين، وقد خلص إلى نتيجة جد مختلفة. لقد اكتشف أنه بعد الصدام تنشر الموجات المناظرة للجسيمات المرتدة شيئًا شبيهًا بتموجات بركة الماء، ما يعني وفق تأويل شرودنجر أن الجسيمات نفسها قد تختفي في كل الاتجاهات. لم يكن لهذا أي معنى منطقي. في النهاية يتعين على الجسيم، حتى إن كان حركة موجية مكثفة، أن يحدد بالطريقة الكلاسيكية. وفق لغة بور، كان هذا حالة عينية لمبدأ التوافق، أنه يتعين على الوصف الكمومي للتصادم أن يخلي الطريق في النهاية إلى وصف كلاسيكي. الأهم من ذلك، أن الأمر بدهي. يتعين على الجسيم أن يكون في مكان ما؛ إذ ليس بمقدوره أن يتشتت بطريقة منتظمة عبر المكان. يتعين على نتيجة الصدام النهائية أن تفضي إلى جسيمات ثنائية متمايزة تتحرك في اتجاهات محددة بطريقة جيدة. هذا ما حدث في تأثيرات كومبتون.

بالبحث وفق هذه المسارات، خلص بورن إلى نتيجة بارعة. لقد اقترح أن الموجات المنتشرة التي تغادر مشهد الصدام لا تصف جسيمات حقيقية بل تصف احتمالاتها. بتعبير آخر، الاتجاه الذي تكون فيه الموجة قوية هو الاتجاه الذي يرجح أن تظهر فيه الجسيمات المرتدة. في المواضع التي تكون الموجة ضعيفة، يكون احتمال ظهور الجسيمات أضعف.

إذا كان ذلك كذلك، فإن معادلة شرودنجر لا تنتج موجة كلاسيكية بل شيئًا جديدًا تمامًا. في حالة الإلكترون الموجود في ذرة، لا يتعين أن تمثل الموجة كتلة أو شحنة منتشرة ماديًا؛ بل احتمال العثور على إلكترون هنا، أو هناك، أو في مكان آخر.

ومهما كان قدر غرابة هذا التصور فإنه يتواءم مع ميكانيكا المصفوفات. لقد حدد هايزنبرج موضع الإلكترون بطريقة عكسية، معبرًا عنه في شكل مركب لخصائص الذرة الكهرومغناطيسية. بمعنى ما، لم يعتبر هايزنبرج حضور الإلكترون المادي مؤشرًا محددًا لمكانه بقدر ما اعتبره توليفة من الأشياء التي يمكن أن يقوم بها.

إقرار بورن أن ميكانيكا الموجات تتعامل مع الاحتمال لم يوضح فحسب ما عنته معادلة شرودنجر؛ بل بينت أيضًا الرابط الفيزيائي، في مقابل الرابط الرياضي، بين ميكانيكا الموجات وميكانيكا المصفوفات. الثمن الذي يتعين دفعه نظير هذا الإقرار هو تدخل الاحتمال في الفيزياء في شكل جديد.

على ذلك، تسللت هذه النتيجة إلى عالم علماء فيزياء الكم المحكم دون أن تحدث جلبة. لم يبد أن هناك من اهتم بوجه خاص بحجة بورن. حقيقة أن نتيجته أثارت اهتمامًا مباشرًا ضئيلاً شكلت بعد سنين مبررًا آخر لإحساسه بالمرارة. في تقدير لاحق لما حدث، نزع علماء فيزياء آخرون إلى القول إنهم عرفوا بطبيعة الحال أن

أفكار شرودنجر في الموجات كان باطلة بشكل بيّن. نعم، كان بمقدورهم رؤية أن الموجات تضمر الاحتمالية. لقد كان في وسع هايزنبرج بالذات أن يقول إن معنى عناصر المصفوفة بوصفها احتمالات كان واضحًا لديه منذ البداية، رغم أنه لم يجهد نفسه في تدوينه. تميل كتب ميكانيكا الكم المنهجية، حتى تلك التي كتبت بعيد نشوء هذا الحقل، إلى إقرار تعريف الاحتمال، غير أنها لا تنعته بأي نعت، كما لو أن الأمر واضح حدًا يغني عن المزيد من الشرح.

من جهة أخرى، أقر بورن نفسه، في مقابلة لاحقة، بأنه ربما لم ير آنذاك إلى أي حد كانت نتيجته ثورية. كان علماء الفيزياء في تلك الأيام على دراية بالفيزياء الإحصائية في القرن التاسع عشر، ولعلهم انشغلوا بإمكان أن تذهب مثل هذه الريبة الاحصائية إلى أبعد من ذلك. لقد كان هناك الرابط الذي أوضحه أينشتين، أنه يتعين على كثافة خطوط الإشعاع المنبعث من الذرة أن ترتبط مع احتمال حدوث تحول داخلي نسبة إلى تحول آخر. كان هناك أيضًا الاقتراح المغري أحيانًا، أنه قد يستبان أن قانون بقاء الطاقة لا يصدق إلا إحصائيًا. وعلى حد قول بورن، "لقد تعودنا الركون إلى اعتبارات إحصائية، وقد بدا لنا أن نقلها إلى مستوى أعمق ليس مهما".

غير أن هذا الرأي الأخير تناقضه كلمات وردت في بحث بورن نفسه، الذي نشر عام 1926، والذي لاحظ فيه أنه لم يعد بالإمكان تحديد ما ينتج عن الصدام بشكل محدد. كل ما في وسعنا تحديده هو احتمالات نطاق من النتاجات. "هنا تثار مسألة الحتمية برمتها"، فيما يضيف بورن. "في ميكانيكا الكم ليست هناك كمية تحدد في حالة فردية نتيجة الصدام ... أنا نفسي أميل إلى التخلي عن الحتمية في العالم الذري".

كانت الحتمية قطب رحى الفيزياء الكلاسيكية، مبدأ السببية الحاسم. إن بورن يعبر الآن بالكلمات عن أشد مخاوف أينشتين، خشيته التي عبر عنها مرارًا لسنين

عديدة. في الفيزياء الكلاسيكية، حين يحدث أي شيء، فإنه يحدث لسبب، لأن حدثًا أسبق منه أفضى إليه، هيأ له الظروف، جعله محتمًا. غير أنه في ميكانيكا الكم، يبدو أن الأشياء تحدث كما اتفق، دون سبب معروف.

إذا كان بورن أبدى ارتباكه حيال معنى اكتشافه، فلا ريب أن أينشتين لم يفعل. قبيل نهاية عام 1926، كتب إلى بورن كلمات أصبحت شهيرة بسبب تكرارها، حتى من قبل مؤلفها الذي أعجب بصياغتها حدًا جعله يلوكها أنى ما سنحت له الفرصة. لقد أخبر بورن بأن "ميكانيكا الكم مهيبة؛ غير أن هناك صوتًا في أعماقي يقول إنها ليست الأصل الحقيقي. إن النظرية تقول الكثير، لكنها لا تكاد تقربنا من سر "الكائن القديم". أما عن نفسي فإنني مقتنع بأن الله لا يلعب بالنرد". إذا كان على الاحتمال أن يحل بديلاً للسببية، فإن الأساس العقلاني لتشكيل نظريات الفيزياء، بحسب أينتشين، قد جرف تمامًا.

وكالعادة ترفّع برضى تام علماء الفيزياء الأصغر سنًا عن هذه الزخرفة الميتافيزيقية، وشرعوا مباشرة في تعريف موجات شرودنجر على أنها مقياس للاحتمال. أما بور، الذي ظل الروح المرشدة، فقد أثنى على ذلك، فيما فضل آخرون أن الانسحاب كلية، خصوصًا منهم مبتكرًا ميكانيكا الموجات، لوي دي بروجلي وشرودنجر نفسه. بعد تبصره القيم الذي يقضي بوجوب أن تكون لدى الجسيمات خصائص موجية، حصل دي بروجلي بجدارة على جائزة نوبل عام 1929، غير أنه لم يقم بعد ذلك بأي إسهام مهم في ميكانيكا الكم. لقد أصر طيلة حياته على أن التأويل الاحتمالي ليس صحيحًا.

وعلى نحو مماثل، أصبح شرودنجر منذ ذلك الحين ناقدًا لميكانيكا الكم أكثر منه مساهمًا فيها. في سبتمبر عام 1926 زار كوبنهاجن، قبل أن يمر وقت طويل على

خلافة هايزنبرج لكرامر في مساعدة بور. لقد أراد بور، على حد قوله، أن يسمع رؤى شرودنجر دون وساطة، أن يفهمها بشكل أفضل.

في الأثناء، ومنذ لحظة وصوله، طارد بور شرودنجر واستمر في الضغط عليه كي يشرح آراءه، سائلاً زائره بطريقته الملحة المعتادة، وهو أسلوب اعتبره بور طبيعيًا في البحث العلمي، فيما بدا لشرودنجر أشبه بتحقيق كافكاوي لا مهرب منه. أصبح شرودنجر تعبًا ومريضًا، فأخذ إلى سريره في المعهد. كانت السيدة بور تغمره بالشاي والكعك المحلى، فيما كان بور يجلس على طرف السرير، ليلاً ونهارًا فيما يبدو، وهو يردد لازمة تقول: "ولكن يا شرودنجر يتعين عليك أن تسلم بأن ...".

كان دور هايزنبرج في تناطح الرؤوس هذا محدودًا. إنه يذكر كيف أن شرودنجر كان يقترح، ومسحة من الحزن تعلو ملامحه، أنه سيظل بالمقدور العثور على سبيل للحصول على صيغة بلانك (1900) لطياف الإشعاع الكهرومغناطيسي دون حاجة إلى الكموم. غير أن بور أخبره، بشكل قاطع هذه المرة، بأنه "لا أمل في ذلك". حاول شرودنجر أن يقاوم، مخبرًا بور أن "فكرة الكم بأسرها تقود إلى هراء"، "أنه لو كان علينا العيش مع قفزات الكم اللعينة هذه، فيؤسفني أني ارتبطت بأية طريقة بنظرية الكم". وقد هدأه بور قائلاً "إن بقيتنا جد ممتنة" لميكانيكا الموجات، بسبب وضوحها وبساطتها.

لم تكن هناك علاقة ودية بينهما. لقد أصبح شرودنجر غاضبًا، فيما يذكر هايزنبرج، غير أنه لم تكن لديه إجابة لحديث بور الناعم وانتقاداته التي لا تنتهي. وهكذا عاد [شرودنجر] منهكًا إلى زيورخ دون أن يغير موقفه.

استمر أينشتين في الإصرار على اعتراضاته. قبيل نهاية عام 1926، كتب إلى سمرفيلد يقول إن النجاحات الفنية العظيمة التي حققتها معادلة شرودنجر إنما تبهم السؤال الأكثر عمقًا، ما إذا كانت تؤمّن بالفعل صورة كاملة لما أصر بشكل غريب على تسميته بـ "الحوادث الواقعية". لقد كان يتساءل بحزن "هل نحن أقرب حقيقة إلى حل الأحجية؟"

تحدث وكتب أينشتين، بشكل متزايد، بالأسلوب الموحي واللماح الذي سوف يشتهر به. سمع علماء فيزياء آخرون أكثر مما أرادوا معرفته عن أسرار "الكائن القديم"، عن الله الذي لا يلعب بالنرد، عن أن الرب قد يكون ماكرًا، لكنه ليس خبيثًا. لقد تحدث أينشتين كما لو أنه الوحيد الذي يستطيع معرفة حقائق الطبيعة الداخلية. لهذا السبب لم يكن ثمة سبيل لإرضائه. لقد اعترض على وجود الاحتمال في الفيزياء، لكنه لم يجد سبيلاً للخلاص منه. غير أن المشكلة على وشك أن تزداد سوءًا.

الفصل الثاني عشر

كلماتنا لا تسعفنا

فيما كان هايزنبرج وشرودنجر، صحبة الأشياع والنقاد، يتنازعان حول معنى الفيزياء التي استحدثوا، تمسك نيلز بور البالغ من العمر واحدًا وأربعين عامًا بدوره مرشدًا وأبًا روحيًا. غير أن علماء فيزياء آخرين بدأوا بشكل متزايد يرتابون في أحكامه ويتناقشون بخصوص آرائه الغامضة. اعترف شرودنجر، بعد أن تجاوز محنته في كوبنهاجن، بشعوره بالإحباط جراء التعامل مع بور. "سرعان ما تشرع المحادثة معه في الخوض في مسائل فلسفية"، فيما كتب لأحد أصدقائه، "وسرعان ما يختلط الأمر عليك، فلا تعرف ما إذا كنت تتبنى الموقف الذي يقوم بالهجوم عليه، أم أنه يتوجب عليك حقيقة أن تهاجم الموقف الذي يقوم بالدفاع عنه".

في سبتمبر، وصل بول ديراك إلى كوبنهاجن، في زيارة سوف تستغرق ستة أشهر. بخصوص أسلوب بور التلميحي الشهير في إلقاء المحاضرات، لاحظ ديراك أن الحضور كانوا "إلى حد كبير تحت طائلة مشاعر الافتتان"، أما عن نفسه فقد شكا من أن "حجج [بور] كانت إلى حد كبير كيفية في طبيعتها، و لم يكن بمقدوري أن أحدد الحقائق التي تستند إليها. لقد أردت إقرارات يمكن التعبير عنها في شكل معادلات، لكن أعمال بور نادرًا ما كانت تتضمن مثل هذه الإقرارت".

ما كان لديراك، موثر العزلة، المقتضب، والفاتر، أن يكون أكثر اختلافًا عن بور الشخصية الاجتماعية. صمته الخرافي مأتاها أن أباه، وهو بريطاني مجنس ذو أصول سويسرية، دأب على الإصرار على أن يتكلم ابنه الفرنسية على مائدة الطعام. وكما أوضح ديراك لاحقًا، "لأني وجدت أنه ليس بمقدوري أن أعبر عن نفسي بالفرنسية،

آثرت الصمت على التحدث بالإنجليزية، وهكذا أصبحت صموتًا فترات طويلة في تلك الآونة ـ وقد حدث ذلك في فترة مبكرة". أكثر من ذلك، يبدو أنه لم يكن لدى والديه أصدقاء، و لم يعتادا على الخروج، و لم يسبق لهما أن استضافا أحدًا إلى منزلهما، ولذا لم تكن فرص بول الصغير في تحدث الإنجليزية غامرة.

كان ديراك يكنّ الاحترام لبور، لكنه لم يكن في حضرته يسرف في التفاؤل أو التوقير. لعل هذا هو السبب الذي جعل بور يجد هذا الإنجليزي السامق الصموت جديرًا على نحو غريب بالإعجاب. وحين كان بور يناضل من أجل التعبير اللفظي عن مفاهيم فلسفية واسعة، لم يكن ديراك يقول سوى القليل. كان ينشد الوضوح المحكم في منطق الرياضيات البحتة ولا يكشف عن صيغه ـ الدقيقة والجافة بعض الشيء ـ إلا حين يكون واثقًا من كل التفاصيل. على ذلك، لاحظ أن التعبير الرياضي الكامل والمنتظم عن نظرية الكم لم يكن كل شيء. وكما قال بطريقته الجافة، "لقد استبين أن الحصول على تأويل أصعب من مجرد حل المعادلات".

كان ديراك سعيدًا بوجه عام بالقيام بدوره وبترك مسائل التأويل للآخرين، و لم يكن لسياسة عدم التدخل هذه أن تناسب هايزنبرج، الذي وجد نفسه على نحو متعاظم على خلاف مع بور الذي أشرف على دراسته. لقد وجد كل منهما نفسه مقحمًا في جدل حاد ودقيق و لم يكن أي منهما مستعدًا للتخلي عن وجهة نظره. في النهاية، هايزنبرج هو من استحدث ميكانيكا الكم؛ و لم يكن له سوى أن يفترض حق ملكية على الطريقة التي كانت تصور بها وتستخدم. في المقابل، ما كان في وسع بور أن يزعزع كلية انطباعه المبدئي عن هايزنبرج بأنه مفكر علمي قليل الخبرة، خيالي بشكل ثاقب، غير أنه غالبًا ما يكون مشاكسًا ومتهورًا. في هذه المرحلة من اللعبة، فيما اعتقد بور، ثمة حاجة إلى الحكمة. ولكن من تراه الرجل المناسب للقيام بهذه المهمة؟

في كوبنهاجن، كان هذان الرجلان يمضيان ساعات معًا خلال النهار، يتحدث بور كعادته دائمًا بأسلوب ملح لا يلين، في حين يجاهد هايزنبرج في مقاطعته، مهتاجًا

ومفعمًا بالحيوية. في المساء غالبًا ما يواصلا المماحكات أثناء جولة يقومان بها حول الحديقة العامة المعشبة والجميلة التي كانت متاخمة للمعهد. غالبًا ما يحدث، حتى في ساعات الليل المتأخرة، أن يدق بور باب حجرة العلية في المعهد حيث كان يقيم هايزنبرج، كي يعرض عليه توضيحًا أو إضافة بسيطة لما كان يحاول قوله. ويحدث مرارًا أن تمتد هذه الهوامش على نقاش النهار بضع ساعات. لم يكن بور يلتزم بأي برنامج ثابت. كل ما كان يتوجب قوله كان يقال في حينه ومكانه. ولأنهما كانا يتصادمان على هذا النحو لأسابيع، سئم كل منهما من النقاش، ومن الآخر.

بشكل أو بآخر، ما كان يتجادلان حوله أثناء تلك الأيام التي لا تنتهي في نهاية 1926 هو مسألة الاستمرار في مقابل الانقطاع الفجائي. وبطبيعة الحال، رغب شرودنجر في رد كل شيء إلى موجات؛ حيث الجسيمات المنفصلة والسلوك النزوي مجرد وهم، وهذا ما كان في وسع هايزنبرج وبور أن يتفقا على أنه قضية خاسرة. غير أن هايزنبرج بالذات، الذي نبذ بحماس الأساليب القديمة، رغب في الذهاب إلى الطرف المعاكس وتبني المذهب الأكثر غلوًا مهما كان الثمن. لقد أرغمت ميكانيكا الكم علماء الفيزياء على التفكر بطرق جديدة، على تعلم لغة جديدة. هذا أمر سيئ جدًا يجب عليهم التعود عليه، أو هكذا زعم هايزنبرج.

بالنسبة لبور، كان هذا موقفًا مختالاً، ولعله سطحي، وهذا أسوأ. وكما أشار مرارًا وبقوة، الوضع والسرعة وسائر يقينيات الميكانيكا الكلاسيكية لم تفقد نفعها فجأة. في العالم خارج الذرة، تظل المفاهيم القديمة باقية. ينبغي وفق بور أن يكون هناك ربط. يتعين أن نكون قادرين على أن نصل من انفصال وتمايز العالم الكمومي إلى الاتصال السلس الذي يسم العالم الكلاسيكي الذي نألف.

وجد هايزنبرج موقف بور محبطًا، يكاد يكون محبطًا بشكل متعمد، كما لو أن الإحباط رغيبة، إلهام جدير بالثناء. كما لو أن بور أراد العثور على سبيل للحديث عن ميكانيكا الكم بلغة كلاسيكية، مسلمًا في الوقت نفسه بحرية استحالة القيام بذلك.

أقله ليس دون تناقض وتعارض. غير أنه لا جدال في أن بور يسعد بعوز الاتساق؛ إنه يشكل خطابه السقراطي الداخلي.

أنى ما زعم هايزنبرج أنه فهم كيف تعمل ميكانيكا الكم، أو أن بمقدوره على أقل تقدير استخدامها، يجد بور بطريقة جديرة بالثقة موضعًا مبهمًا، عوزًا في الوضوح المنطقي. وفيما يذكر هايزنبرج، "أحيانًا ينشأ لديَّ انطباع أن بور حاول فعلاً أن يقودني إلى Glatteis [جليد] إلى أرض زلقة .. أذكر أن هذا كان يغضبني أحيانًا." غير أنه اعترف حزينًا بأنه إذا تسنى لبور أن يضع يده بشكل موثوق به على مشاكل دقيقة، فلعلها تكون في النهاية على أرض زلقة.

لم يكن في وسع تناطح الرؤوس أن يطول أكثر من هذا. بحلول مطلع عام 1927، قام كل من بور وهايزنبرج بصياغة وإعادة صياغة آرائه مرارًا إلى حد أن الحوار بينهما أضحى شبيهًا بحوار الطرشان، وأصبح الواحد منهما مصابًا بإحباط لا أمل في الخلاص منه مآتاه شعور بأنه لن يقبل ما يقوله الآخر. في فبراير، ذهب بور إلى النرويج، كي يمضي بعض الوقت في التزلج. كان خطط هذه الرحلة أصلاً لكليهما، غير أنه أصبح الآن يفضل الذهاب وحيدًا. في الأثناء، كان هايزنبرج يجهد نفسه بالمشي حول الحديقة العامة في بداية المساء، دون أن يعترض بور خطواته.

غير أن صدى صوت بور المزعج ظل يراوده. لنفترض، كما أقر بور، أنه يتعين على الموضع والسرعة أن يحافظا على معنى، حتى إن لم يكن المعنى التقليدي الذي أقره علماء الفيزياء دومًا؛ فما عسى هذا المعنى الجديد أن يكون؟ وكيف له أن يصل إليه؟

في جدلهما حتى الآن، تعامل هايزنبرج وبور مع المسألة على أنها مسألة نظرية. كانت الميكانيكا الكلاسيكية تعمل بمجموعة من المدركات، فيما كانت ميكانيكا الكم تعمل بمجموعة أخرى؛ فما السبيل إلى المواءمة بينهما؟ كانت المسألة، وهنا

نستعير تعبير ديراك، مسألة اقتناص تأويل، سماع ما تحاول الرياضيات قوله. الحال أن ديراك أمّن مفتاحًا مهما، رغم أن هايزنبرج لم يفهمه مباشرة.

حين كان في كوبنهاجن، وضع ديراك اللمسات الأخيرة على عرضه المهيب لميكانيكا الكم؛ حيث بيّن بطريقة عامة وبشكل تام كيف يتم تعريف المكافئ الكمومي لمشاكل الميكانيكا الكلاسيكية . كان في وسعه أيضًا أن يقوم بالعكس ـ أن يبين كيف يكون شكل النسق الميكانيكي الكمومي حال الإصرار على وصفه بلغة كلاسيكية. غير أنه وجد أن هناك تعارضًا مثيرًا ينشأ في هذه الترجمة. إذا بدأنا على سبيل المثال بنسق كمومي من الجسيمات، سوف يكون بمقدورنا إعداد صورة كلاسيكية تشكل فيها أوضاع الجسيمات العناصر الأولية، ولنا أن نختار بدلاً من ذلك الحديث وفق سرعة الجسيمات ـ أو بالأحرى كمية الحركة، أي حاصل ضرب الكتلة في السرعة، التي يعتبرها علماء الفيزياء الكمية الأكثر أساسية. الغريب أن صور هذا الوضع وكمية الحركة لم يتطابقا على النحو المفترض، لو أنهما كانا حقيقة مجرد صور بديلة لنسق مؤسس مفرد. كما لو أن التصور المؤسس على الوضع والتصور المؤسس على كمية الحركة يصوران بطريقة ما نسقين كمومين مختلفين، ولا يصوران النسق نفسه بطرق مختلفة.

واجه بولي الحرج نفسه. لقد كتب إلى هايزنبرج عنه، باستخدام p رمزًا متعارفًا عليه لكمية الحركة، فيما قام الحرف التالي q مقام الوضع. "لك أن تنظر إلى العالم عبر الـ p's، ولك أن تنظر إليه عبر الـ q's، ولكن إذا فتحت كلتا عينيك في الوقت نفسه، سوف تصاب بالجنون"، أو هكذا قال.

لا تكشف الجسيمات الكمومية عن نفسها بوضوح. إنها تفضي إلى صور متناقضة. هذه هي الأحجية التي ناضل معها هايزنبرج. كيف يجد سبيلاً لإرغام ميكانيكا الكم على البوح بأسرارها، كي يرى ما يحدث في الداخل؟

لم يكن بمقدوره! تلك هي الإجابة التي ومضت في عقله ذات مساء حين كان

يمشي متثاقلاً في الحديقة العامة، غارقًا في تفكيره. وتمامًا كما لاحظ في هيلجولاند أنه يستحيل وصف القفزات الكمومية بلغة الفيزياء الكلاسيكية المتصلة، فإن الدرس نفسه قد ألح عليه، ولكن بطريقة أوسع. لا سبيل لإرغام النسق الكمومي على الإفضاء إلى وصف يحوز معنى واضحًا في اللغة الكلاسيكية.

حسن، ولكن أليس هذا ما كان يحاول قوله لبور لشهور؟ باستثناء أنه شرع الآن يرى وجهة نظر بور. قد لا يتسنى لك أن تخلص إلى تصور واضح ـ لكن هذا لا يعني، كما حسب هايزنبرج حتى ذلك الوقت، أن تكف عن المحاولة وتواصل المسير. يجب عليك أن تجد طريقة ما في الحديث عن الأنساق الكمومية.

أخيرًا استطاع هايزنبرج فهم أمر لم يسبق له ولا بور فهمه. لم يكن السؤال الحاسم سؤالاً نظريًا، ناهيك عن أن يكون، كما حسب بور غالبًا، سؤالاً فلسفيًا. إنه في النهاية سؤال عملي.

قد لا يكون في وسع المرء الحديث عن وضع وكمية حركة الأشياء الكمومية بطريقة تحوز معنى وفق القواعد القديمة. غير أنه يستطيع، فيما أصبح هايزنبرج يرى الآن، أن يقوم بما كان علماء الفيزياء يقومون به دائمًا ـ عزو معنى إلى الوضع وكمية الحركة عبر القيام بقياسهما. السبيل للنفاذ عبر الخلط النظري إنما يتعين في إيلاء اهتمام للأمور العملية.

لم يكن يحتاج إلا للتفكر في مثال بسيط يوضح تبصره. ولأنه ربما احتفظ في ذهنه بتجربة كومبتون الأنيقة التي أجراها قبل أعوام قليلة، عثر على المثال المباشر على نحو آسر الذي سوف يجعل اسمه أيقونة. إلكترون يحلق في الفضاء. ملاحظ يسلط الضوء عليه، ثم يكشف الضوء المرتد من الجسيم السريع. بقياس هذا الضوء المتناثر ـ تردده واتجاهه ـ يستطيع الملاحظ أن يستنتج موضع وكمية حركة الإلكترون لحظة اصطدام الضوء به. وهنا، فيما اكتشف هايزنبرج، يصبح الأمر مثيرًا.

يتكون الضوء من كمومات ـ أو فوتونات، حسب تسمية عالم الفيزياء الكيميائية الأمريكي جلبرت لويس [Gilbert Lewis]. المواجهة بين أحد هذه الفوتونات والإلكترون المحلق حدث كمومي. وكما أثبت بور، فإن هذه المواجهة لا تفضي إلى نتاجات محددة؛ بل تقود إلى نطاق من النتاجات الممكنة، ذات احتمالات متنوعة. بعكس هذا المنطق، أصبح هايزنبرج يدرك الآن أن الملاحظ لا يستطيع أن يستنبط حدثًا مفردًا متفردًا كان له أن يفضي إلى النتيجة المقاسة. لعل ما حدث عبارة عن نطاق من المواجهات الإلكترونية – الفوتونية المحتملة. هذا يعني، فيما ارتأى، أنه سوف يستحيل أن نستنبط بشكل متفرد كيف كان موضع وكمية حركة الإلكترون.

لقد قال بولي إنك تستطيع أن تنظر إلى الموضع أو تستطيع أن تنظر إلى كمية الحركة، لكنك لا تستطيع أن تنظر إلى الاثنين. حين تمعن هايزنبرج في الأمر، لاحظ أن الأمر ليس بهذه السهولة. إنها ليست مسألة إما أو، بل تسوية لا مناص منها. كلما جاهد الملاحظ في الحصول على معلومات عن موضع الإلكترون، قل احتمال درايته بكمية حركته، والعكس بالعكس. وعلى حد تعبير هايزبنرج، سوف يكون هناك دائمًا Ungenauigkeit ("عوز دقة") في النتائج.

أثناء غياب بور، أقنع هايزنبرج نفسه بهذه الخلاصة الهائلة والمدهشة. لقد تعلم أن يحذر من تدقيق بور المكثف في الأفكار الجديدة. كتب إلى بولي رسالة طويلة يشرح فيها ما خلص إليه، غير أنه لم يرسل لبور سوى رسالة قصيرة يقول فيها إن هناك تطورًا مثيرًا في انتظار عودته. آنذاك كان هايزنبرج قد بعث ببحثه للنشر. اطلع بور على البحث، أدهشه، ثم استشعر صعوبات كأداء.

لقد وصف هايزنبرج مواجهة بين جسيمين، فوتون وإلكترون، واكتشف عوزًا في الدقة ناجم عن عدم قابلية ذلك الصدام للتنبؤ. استحدث بور ـ على نحو متذمر وبشكل محتم ـ طريقة أخرى في رؤية الأمر. الملاحظ الذي يستشعر وجود فوتون يقيسه ليس بوصفه جسيمًا بل بوصفه حزمة صغيرة من الموجات. في علم البصريات الكلاسيكي، فيما ذكّر هايزنبرج، لدى الموجات قدرة تبيّن غاية في المحدودية. هذا

يعني أن ليس بمقدور الضوء ذي طول موجي بعينه أن يوضح صور أي شيء أصغر من ذلك الطول الموجي. سوف تصبح هذه الصورة ضبابية. هذا، فيما يقول بور، هو تفسير ما اكتشفه هايزنبرج. إن عوز الدقة ناجم عن استخدام معلومات من قياس موجي في استنتاج خصائص الجسيم.

أغضبت إعادة التأويل التي يقول بها بور هذه هايزنبرج. أولاً، لأن بور كان يعيد الموجات إليها، التي كانت تحمل لوثة اسم شرودنجر، وثانيًا، بدا أن حجة بور تتعلق بحدود علم البصريات الكلاسيكي، وليس بعدم قابلية الحوادث الكمومية للتنبؤ.

رد بور رافضًا. المزج بين مفاهيم غير قابلة للمقارنة ـ الجسيمات والأمواج، الصدامات الكمومية والقدرة التبيينية البصرية ـ هو السبب الحقيقي وراء تسلل عوز الدقة. عوز الدقة علامة خارجية على عوز التطابق بين المبادئ الكمومية والمبادئ الكلاسيكية. إن هذا التأويل، على حاله، يتسق بشكل رائع مع أفكار كان يتأمل فيها بور حين كان يتزلج وحيدًا في النرويج. لقد طور مبدأ جديدًا، لن يلبث حتى يسمى بمبدأ "التتام"، مؤداه أن لدى الجانب الموجي والجانب الجسيمي من الأشياء الكمومية أدوارًا مهمة لكنها متناقضة تقوم بها. وفقًا على المشكلة، قد يتبوأ هذا الجانب أو ذاك منزلة الصدارة، غير أنه لا سبيل لإغفال أي منهما كلية. إن عوز الدقة الذي يقول به هايزنبرج، فيما أكد بور، شاهد حقيقي على هذه التنافر المحتم.

شده هايزنبرج. لقد تسنى له الوصول إلى نتيجة رائعة بطريقة مباشرة، وهاهو الآن بور يريد حجبها خلف الضباب الميتافيزيقي الذي كان يفضل والذي يجده هايزنبرج قمعيًا. رغب هايزنبرج في نشر اكتشافه. أما بور فقد أراد منه أن يتصل بالمجلة العلمية وأن يطلب منها إيقاف النشر إلى أن يتسنى لهما معًا إعداد أفضل عرض في الفيزياء. رفض هايزنبرج. بعد ذلك عثر بور على خطأ فني في تحليل هايزنبرج يذكّر، على نحو كدّر هايزنبرج كثيرًا، بالخطأ الذي ارتكب قبل أعوام في دفاعه عن أطروحته، حين حاول أن يجيب عن أسئلة ويلي فين حول النظرية البصرية القياسية. أصر هايزنبرج على أن المشكلة ليست كبيرة وواصل المسير. في النهاية، في شهر مايو، وافق على

مضض على إضافة هامش في نهاية البحث، قبيل طباعته مباشرة، شاكرًا بور على توضيحاته ومسلمًا بأن المصدر الدقيق "للريبة" الملاحظية - وهو الآن يستخدم التعبير الذي يفضله بور - قد لا يكون واضحًا بالقدر الذي يشي به بحثه.

دخل مبدأ هايزنبرج الشهير في الريبة العالم بهذه الطريقة المؤلمة والمشاكسة. حين كان بور وهايزنبرج يتشاحنان كرًا وفرًا حول أفضل سبيل للتعبير عنه، تعينت الصعوبة المحتمة، حسب هايزنبرج، في أن "كلماتنا لا تسعفنا".

ثمة كلمات بعينها سببت صعوبة محددة. كتب هايزنبرج متعبًا إلى بولي، ملاحظًا أنه "لا ريب في أن كل نتائج البحث صحيحة، وأنا وبور متفقان بخصوصها - كل ما في الأمر أن هناك فيما بيننا اختلافات ذوقية لا يستهان بها حول كلمة "anschaulich" [الواضح، الظاهر]. لقد سبب هذا النعت مشاكل لعلماء الفيزياء الألمان، والمزيد منها لمن حاولوا ترجمتها إلى الإنجليزية. لقد عنون هايزنبرج بحثه في عوز الدقة على النحو التالي:

"Uber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik"

الذي ترجمه أحد المؤلفين هكذا: "في المحتوى المحسوس لعلم الحركة النظري والميكانيكا"، فيما ترجمه آخر كالتالي: "في المحتوى المادي ...". هناك أيضًا من ترجم كلمة anschaulichen إلى "بدهي". كما لو أن كلمة واحدة تعني "عيني" و"مجرد".

يعني الفعل anschauen "ينظر في"؛ لذا فإن الشيء يكون anschaulich حين يكون قابلاً لأن يتم النظر فيه. لقد أراد هايزنبرج الحديث عن ظواهر يستطيع عالم الفيزياء من حيث المبدأ أن يلاحظها، وهذا مأتى ترجمة anschaulichen إلى "محسوس" - أي قابل لأن يحس. هذا أيضًا مأتى ترجمتها إلى "مادي" - أي كميات تحوز معنى إمبيريقيًا بالطريقة التقليدية. من هنا، وبعد بعض الوثبات والقفزات،

جاءت كلمة "بدهي"، لأن الكميات التي تحوز معنى لعلماء الفيزياء، مثل الوضع وكمية الحركة، هي تلك التي تحوز دلالة مألوفة أو تتسق مع الفهم المشترك. (يكمن الخلل هنا في أنه لم يكن هناك من يعتبر كمية الحركة بدهية إلى أن استحدثها نيوتن وجعلها جزءًا من فهم العلماء الأواخر الفطري).

الكلمة الأكثر شهرة التي دخلت الفيزياء ثم أوساطًا أوسع ليست أقل مدعاة للاحتراز. في حديثه عن القياسات التجريبية، استخدم هايزنبرج بشكل متسق كلمة Ungenauigkeit، "عوز الدقة". غير أنه في أحد أجزاء البحث، حين كان يشير إلى الحكم النظري الذي أقره كل من ديراك وبولي عن الغموض في الوصف النظري لأي نسق، استخدم كلمة Unbestimmtheit، المشتقة من الفعل bestimmen، "يحدد". لقد عقد تمييزًا، بين عوز الدقة في النتائج التجريبية ولاتحددية الأوصاف الرياضية. أما كلمة Unsicherheit، "الريبة" [اللاتيقن]، فتظهر فجأة في هوامش نهاية البحث، وقد اختارها بور، وعبر بور وجدت سبيلها إلى معجم علماء الفيزياء الذين يتحدثون الإنجليزية.

الراهن أن "عوز الدقة" تعبير رديء في وصف ما عثر عليه هايزنبرج، لأنه لا يميز العجز الجديد الذي قام بتحديده والناجم عن صعوبة جعل أي قياس دقيقًا، وهي صعوبة غامرة الحضور وقديمة. هناك قلة من علماء الفيزياء التقليديين يفضلون الحديث، بالإنجليزية، عن مبدأ اللاتحددية [indeterminacy]، وهو تعبير أفضل. (في ملحق مسرحيته "كوبنهاجن"Copenhagen ، يقترح مايكل فريان [Michael Frayan] عبارة تظل أوفى بالغرض: "عدم القابلية للتحدد"[indeterminability].) في الوقت الراهن، يشير علماء الفيزياء الذين يتحدثون الألمانية إلى die unscharfe Relation، وهو خيار جيد. في الألمانية كما في الإنجليزية، sharpness وصف للصورة الواضحة، ولذا فإن unscharf تعني "ضبابية". الحديث عن مبدأ الضبابية يقترح مضامين جيدة، أنه كلما أمعنت في التحديق صعب عليك معرفة ما تحاول رؤيته. غير أن "الضبابية" "blurriness" ليست كلمة مهيبة بما يؤهلها لدخول المعجم الإنجليزي في هذا الوقت المتأخر.

"كلماتنا لا تسعفنا"، قال هايزنبرج لبور، ولعله انتقل من كلمة إلى أخرى لأنه اعتقد أنه ليست هناك كلمة تعبر تمامًا عن فكرته. غير أنه يبدو أن بور اعتقد أنه سوف يعثر على الكلمة أو التعبير الصحيح، لو أنه واصل البحث. لقد كان يصر على أنه لا أمل لعلماء الفيزياء في فهم ميكانيكا الكم على أنها ليست مجرد مجموعة من العلاقات الرياضية إلا بالتعبير عنها بكلمات مفهومة.

في يونيو 1927، زار بولي كوبنهاجن، آملاً أن يقوم بدور الوسيط بين القطبين المتحاربين. في إحدى المرات اغرورقت عينا هايزنبرج بالدموع بسبب تحقيقات بور التي لا تنتهي. في مناسبات أخرى، كان شعوره بالإحباط يجعله يرد بعنف وحنق. في المقابل، كان بور، في كل هذه المناسبات، وفي مقابلاته الأسبق مع شرودنجر، يحتفظ بسكينته، وبهدوءه الذي لا يطاق. أما بولي فكان يهدئ من روع هايزنبرج قليلاً، لكن الجدل لم يفض إلى نتيجة عظيمة.

وعلى أي حال، كان هايزنبرج على وشك مغادرة كوبنهاجن كي يتولى منصبًا أكاديميًا في جامعة ليبزج. هناك، بعيدًا عن حضور بول المزعج، تفكر هايزنبرج فيما حدث في الأشهر القليلة الأخيرة، وبعد فترة كتب حزينًا إلى بور، متأسفًا عن كيف أنه بدا منكرًا للجميل. وفي زيارة قصيرة في نهاية العام إلى كوبنهاجن، أسهم في ترميم العلاقة بينهما.

على ذلك، لن تكون هناك علاقة فكرية وثيقة أو مكثفة أو صعبة كالتي انعقدت بينهما حين كان هايزنبرج مساعدًا لبور. كان هايزنبرج، الذي لم يتجاوز السادسة والعشرين آنذاك، قد حقق أمنه حين عيّن أستاذًا (وليس مجرد مساعد)، الأمر الذي، ضمن أشياء أخرى، هدأ من انشغال أبيه المتواصل من أنه يبدد مواهبه الفكرية في أمور تافهة. في الأثناء، عثر بور، الذي ربما أزعجه إصباح هايزنبرج يعمل وحيدًا، على حجة جديدة جريئة ومحيرة بدا أنها تهدد المبادئ التي كان علماء الفيزياء يوقرون، وشرع في القيام بمهمة جديدة، صياغة فلسفة صحيحة لفهم مفهوم الريبة الغريب هذا.

الفصل الثالث عشر

معجم تعاويذ بور المريع

رغم السمعة السيئة التي اكتسبها مبدأ الريبة لاحقًا، فإنه لم يثر قلقًا ورفضا فورين في أوساط الفيزياء والفلسفة. لقد سبق لبورن، الذي اعتبر موجات شرودنجر تمثيلات احتمالية، أن قال إنه يتعين على الحتمية أن ترحل، كما لاحظ بولي وديراك أن ثمة شيئًا غريبًا بخصوص الطريقة التي أفصحت بها الفيزياء الكمية عن نفسها للعالم الخارجي. حددت ريبة هايزنبرج تلك الغرابة، وضعت رقمًا عليها، ولعل الأهم من ذلك - نسبة إلى هايزنبرج - أنها قضت على ما تبقى من آمال في أن يتمكن شرودنجر من أن يستعيد بموجاته نوعًا من الواقعية الكلاسيكية للفيزياء.

تعلق هذا النقاش، عند النزر القليل الذي خاض فيه، بأعمال فيزياء الكم الداخلية. كان بور، بتطوير فلسفته في التتام، هو الذي جاهد في تحديد الطريقة التي يتعين وفقها على ظواهر الكم أن تجعل نفسها معروفة في سياق أوسع. لقد نتج التتام عند بور عن فكرة التطابق، أنه يتوجب على العالم الكمومي أن يتحول بطريقة سلسة إلى العالم الكلاسيكي الذي نظل نشهد من حولنا. كان يفترض أن يجعل التتام ميكانيكا الكم قابلة للفهم وعملية عند القطاع الأعظم من ممارسي أنشطة علم الفيزياء. لقد انتقلت جوانب فيزياء الكم الثورية حقيقة إلى مرحلة أوسع عبر محاولة الترجمة هذه.

بعد أن غادر هايزنبرج كوبنهاجن إلى ليبزج، شرع بور في عملية تأليف بطيئة ومؤلمة لتأويله الخاص لمبدأ الريبة. صحبة مساعده الجديد، أوسكار كلين [Oskar Klein]، الذي كان يدوّن ما يملي عليه، كان بور يفكر بصوت عال، يجرب آراءه، وفي كل صباح كان ينبذ ما كدّ كلين في تدوينه اليوم السابق، ويبدأ من جديد. حين

سافر آل بور إلى كوخهم القروي على الساحل الدنمركي، شمال كوبنهاجن، لقضاء عطلة الصيف، ظل كلين مرابطًا بالقرب منه. تواصلت عملية التأليف البطيئة بشكل مؤلم. أحيانا كانت مآقي مارجريت بور [Margrethe Bor]، الجذلانة رواقية الطبع، تحتقن بالدموع - ليس لأنها كانت، كما في حالة هايزنبرج، تناقش رؤية زوجها للفيزياء؛ بل لأنه عانى من شرود ذهني طويل عما كان يفترض أن يكون إجازة عائلية. آنذاك، كان لدى آل بور خمسة أطفال مفعمين بالحياة، جميعهم من الذكور، وكان الطفل السادس على وشك أن يولد.

رغم كل تردده وعصبيته أثناء البحث عن الصياغة المناسبة، لم يحدث أن تزعزعت ثقة بور في اعتقاده الأساسي. يتعين على أي وصف عملي لخصائص أو سلوك الشيء الكمومي أن يعبر عنه في النهاية بلغة كلاسيكية. لم يكن هذا موضع نقاش. بالضرورة نتيجة أية تجربة معطى عيني، وليس سحبًا من الاحتمالات.

اعتقد بور أن الريبة والتتام قد سلطا الضوء على السبب الذي حال دون أن تكون موجات شرودنجر المكونات الكلاسيكية التي أراد لها صاحبها أن تكون صوريا، معادلات شرودنجر حتمية بالمعنى القديم. إذا كنت تعرف الدالة الموجية لنسق ما في وقت بعينه، بمقدورك أن تحسبه بدقة وبطريقة لا لبس فيها في أي وقت لاحق - طالما لم تحاول إجراء أية ملاحظات في الفترة الفاصلة. القياس هو ما ألزم بتأويل بور الاحتمالي للموجة: النتائج المختلفة ممكنة، باحتمالات مختلفة.

في المقابل، حتمت ريبة هايزنبرج وجود تنافر بين قياس ممكن وآخر. في وسع الملاحظ أن يختار قياس هذا أو ذاك، غير أن عليه أن يقبل عدم القابلية النتائج للمقارنة. وهذه الريبة تسهم في تشكيل تطور النسق. إن دالة الموجة الكمومية تتغير كي تعكس حقيقة أن نتيجة قياس بعينه قد حدثت وأن احتمالات أخرى لم تحدث - وهذا بدوره يؤثر في النتائج الممكنة لقياسات لاحقة قد تجرى. لقد كان التتام طريقة بور في محاولة الحفاظ على كل هذه الإمكانات المتعارضة تحت سقف واحد.

عرض بور فلسفته الشاملة في سبتمبر 1927، في لقاء عقد في كومو شمال إيطاليا، احتفالاً بمرور قرن على وفاة إليساندرو فولتا [Alessandro Volta]، رائد الكهرباء الإيطالي. تاريخيًا، دشنت محاضرته الإعلان الرسمي في العلم عن طرح فكرة أن القياسات ليست تصورات خاملة لعالم موضوعي بل تفاعلات عاملة يسهم فيها على نحو ضروري ومتصل الشيء المقاس والطريقة التي قيس بها في تحديد الناتج. على ذلك، وفي الوقت نفسه، كانت ملاحظات بور المضنية والملتبسة لا تحدث أثرها في معظم الأحوال. الذين لم تسبب لهم الإرباك الكامل شعروا أن بور يحاول لسبب ما قول أشياء يعرفونها أصلا، ولكن بأسلوب مبهم على نحو لا مدعاة له.

أعد بور تصورا لمحاضرته في كومو كي ينشر في مجلة Nature العلمية. استغرق الأمر عدة شهور من إعادة صياغة المخطوط المتعبة، التماسات من المحرر، مساعدة من بولي، اعتذارات مهينة من بور، يتبعها المزيد من التأخير. رافق النتيجة، التي طبعت أخيرا في أبريل من العام التالي، تعليق كتبه المحرر يأسى على حقيقة أن بور قد استبعد أي احتمال في استعادة مبادئ الفيزياء الكلاسيكية، غير أنه أفصح عن أمله، كبديل بائس، في ألا تكون عبارات بور المراوغة "الكلمة الأخيرة في هذا الموضوع، وفي أن [علماء الفيزياء] قد ينجحون في التعبير عن المصادرة الكمومية في شكل يوحي بصور ذهنية".

قال بور، على سبيل المثال، إنه كان وزملاؤه "يكيفون أساليبنا في الإدراك المستعارة من الحس على الدراية المعمقة بشكل تدريجي بقوانين الطبيعة"، وهذه جملة لا تكاد تفي الاستحقاقات النحوية، ولا ريب أنها جعلت القارئ العادي لمجلة Nature، كما جعلت من يحاول تأويل الطبيعة، يفغر فاه دون حول أو قوة.

هكذا ظهرت فكرة أن القياسات تزعج النسق المقاس، وهي فكرة تقال غالبا وفق فهم محدود. ولكن، وكما حاول بور أن يوضح، كل القياسات تشكل إزعاجًا للشيء المقاس. الجديد في ميكانيكا الكم، وهذا ما حاول تبليغه، هو أن القياس يقوم في الواقع بتحديد ما يتم قياسه. ما تحصل عليه من القياس يتوقف على ما اخترت قياسه،

وهذا ليس جديدًا، ولكن قياس جانب من النسق، كما بين هايزنبرج، يوصد الباب في وجه ما يمكن اكتشافه من أشياء أخرى، ومن ثم فإنه يقيد بشكل محتم المعلومات التي يمكن لأي قياس مستقبلي أن يفضي إليها.

في كومو، وقف بورن ليقول بإيجاز إنه يتفق إلى حد كبير مع بور. الأمر المهم هو أن هايزنبرج فعل الشيء نفسه. لم يكن يعلم بالمواجهة المتوترة والضارية مع بور في الأشهر السابقة سوى شخص أو اثنين من المقربين. يبدو الآن أن كل شيء انتهى، وأنه لم يكن لدى هايزنبرج ما يقوله سوى الشكر والثناء على مشرفه.

هكذا بدأت عجلة ما يسمى بتأويل كوبنهاجن لميكانيكا الكم في التحرك، وهذا ظرف لم يثر حفيظة علماء الفيزياء فحسب بل حتى المؤرخين وعلماء اجتماع العلم. لقد بدا الأمر كما لو أنه مؤامرة. يبدو أنه بالرغم من الخلافات الداخلية الكثيرة، توحد معسكر بور علنا للقضاء على أي نقد قد يوجه ممن لا ينتمون إلى الحلقة الداخلية. هايزنبرج تحديدا ابتلع اعتراضاته، مسح دموعه، وامتثل تمامًا لتعليمات الحزب.

أتراه استسلم، كما فعل كرامر، لقوة بور التي لا تقاوم، أم تراه انهار في مواجهة قدرة بور على الجدل التي لا تنفد؟ أم أن رغبة هايزنبرج الجامحة في تولي منصب الأستاذية في ألمانيا، كما يرى البعض، اضطرته إلى التنازل لآراء بور، كي يريه أنه سوف يكون زميلاً جديرًا بالثقة ويمكن أن يعوّل عليه ، وليس شخصًا حاد الطبع أو من الخوارج عليه.

لا يبدو أن أيًا من هذه التخمينات مرجحًا. ففي النهاية، أظهر هايزنبرج قدرة كافية على التكيف للإصرار على نشر بحثه في الريبة قبل أن يثني عليه بور بشكل مناسب. في عمر بلغ السادسة والعشرين، كان هايزنبرج مسؤولاً عن التبصرات الأساسية التي خلقت ميكانيكا الكم في المقام الأول، كما أنه فصّل آنذاك في واحد من أكثر نتائجها المقلقة والشاملة. ورغم بعض الخلافات الأساسية حول الفيزياء، نال

إعجاب أينشتين وبلانك. لهذا يصعب تصور أنه استشعر الحاجة إلى كتم آرائه من أجل الحصول على وظيفة.

التفسير البسيط ليس خاطئًا ضرورة. بعد أن غادر كوبنهاجن، عاين سلوكه فاتضح له أن بعض مشاعره العدائية لم يكن باعثها احترام الذات فحسب؛ بل شعور بعدم الرضا الناجم عن كون بور لم ير الريبة كما رآه هو على وجه الضبط. لقد عنّفه بولي كي يمنح أفكار بور المزيد من الاعتبار. ربما لم ترق العمومية الجارفة والغموض المصاحب لمبدأ التتام لذوق هايزنبرج، ولكن حين يتعلق الأمر بكيفية فهم علماء الفيزياء لميكانيكا الكم، لم يكن في وسعه أن ينكر أن استراتجية بور قد استوعبت حقيقة مهمة، وأنها، ببساطة، كانت مفيدة.

باختصار، غيّر هايزنبرج رأيه، لأنه رأى أن بور أمّن طريقة أفضل للمضي قدمًا. لقد كان براجماتيا، وليس هناك مبرر للتشكيك في صدقه.

إذا لم يكن لقاء كومو مهما بشكل مميز، فإن غياب أينشتين وشرودنجر من ضمن أسباب ذلك. لقد قدّم أينشتين خلال ربيع 1927 بحثًا دافع فيه عن تأويل واقعي - غير احتمالي - لموجات شرودنجر، غير أنه قام بسحب البحث، بعد مراسلة مع هايزنبرج فيما يبدو. لم يكن يفضل الريبة، غير أن محاولته العثور على حجة مضادة لم تقده إلى أي شيء. ظل أينشتين، قلقًا ومحبطًا، في برلين؛ حيث سيلحق به شرودنجر بعد قليل زميلاً في الجامعة. تقاعد بلانك رسميًا، فكان شرودنجر، الشخصية المرحة والمحافظة علميًا، بديلاً مقبولاً.

ظاهريًا، لا بد أن التتام قد راق لأينشتين. في وقت مبكر تبكير عام 1909، حين كان يدافع وحيدًا عن واقعية الفوتون، قال إنه يتعين على الفيزياء النظرية "أن تمنحنا نظرية جديدة في الضوء يمكن تأويلها على أنها تدمج بين النظرية الموجية ونظرية الإصدارات [أي الفوتون]". وقبيل إطلاق هايزنبرج لمبدأ الريبة، ألقى أينشتين محاضرة في برلين في الحاجة إلى تشكيل مركب من الآراء المتعارضة. غير أن مثل هذا

المركب، عند أينشتين، سوف يخلصنا ضرورة من التعارضات التحتية. في المقابل، فإن تتام بور، مثل صاحبها، يتهج فيما يبدو بالتناقض.

بعد أسابيع قليلة من انتهاء لقاء كومو، اجتمع كثير من علماء الفيزياء أنفسهم في بروكسل لحضور مؤتمر سولفي الخامس في الفيزياء، تحت عنوان "الإلكترونات والفوتونات". كان ارنست سولفي [Ernest Solvay] عالم كيمياء بلجيكي ومتحمس هاو للعلم حقق ثروة عبر معالجة صناعية لكربونات الصوديوم. في عام 1911، وبعد أن أثارته فيزياء الذرات والإشعاع الوليدة، موّل لقاء اقتصر على المدعوين عقد في فندق ميتروبول الفاخر في بروكسل؛ حيث تناقش في ظروف مرفهة عشرون نجمًا - منهم أينشتين، بلانك، روثرفود، ومدام كوري - حول الأسئلة الأكثر إلحاحًا عليهم.

استقبل هذا اللقاء استقبالاً جيدًا جدًا جعل سولفي يقرر عقد مؤتمره مرة كل ثلاث سنوات. توقف المؤتمر بسبب الحرب، لكنه تواصل بعد ذلك، حتى أصبحت مؤتمرات سولفي ساحة للعديد من النقاشات العلمية الأكثر تركيبا وعمقا في السنوات التي أعقبت الحرب. ظلت هذه المؤتمرات حكرًا على المستضافين؛ حيث لم يتجاوز عدد المشتركين عشرين أو ثلاثين عالمًا.

وبسبب استبعاد العلماء الألمان بعد الحرب، لم يتسن عقد مؤتمر دولي حقيقة حتى اللقاء السولفي الخامس عام 1927. عاد أينشتين، فيما حضر بور أول مرة، بعد أن غاب عن لقاء عام 1924 بسبب المرض. (سولفي نفسه توفي عام 1922). وفي اللقاء السولفي الخامس كانت هناك مسألة كبرى معروضة للنقاش: ميكانيكا الكم ومبدأ الريبة، وكلاهما لم يكن موجودا قبل ثلاث سنوات.

حدث تقسيم لافت بين الحرس القديم والجديد، باستثناء أن بور رفض كعادته أن ينضم بهدوء إلى أي من المعسكرين. لم يرض صغار السن، خصوصا هايزنبرج وبولي وديراك، إلا بالدفع بميكانيكا الكم إلى الأمام عبر تطبيقها على مشاكل لم يسبق حلها تتعلق بالذرات، والفوتونات، والإشعاع. كان صبرهم حيال أي شيء يشي بالفلسفة،

أو علم الدلالة، أو الحذلقة قد نفد تمامًا. في الجانب الآخر، حاول دي بروجلي كبح جماح الطليعة بالدفاع عن ابتكار شرودنجر لصياغة مقبولة علميًا لميكانيكا الكم، في حين أعد شرودنجر دفاعًا عامًا عن مفهومه في الموجات الكمومية، رافضًا التأويل الاحتمالي. أثار حديثه نقدًا حادًا من بورن وهايزنبرج تحديدًا، فيما ظل شرودنجر مطأطئًا رأسه بقية الاجتماع.

أما أينشتين، الذي كان لا يستجيب إلا لرؤيته، وإن ظل رئيسًا للمعسكر التقليدي، فلم يقدم بشكل رسمي أية ورقة بحثية. كان استضيف للتحدث عن وجهة نظره في ميكانيكا الكم، لكنه توسل إعفاءه، بعد بعض التردد، قائلاً إنه لم يتقص الأمر بالدقة التي يفضل، وإنه يؤثر الجلوس مستمعًا. خلال محاضرات المؤتمر، غالبًا ما كان يلتزم الصمت ويتكتم عن انشغالاته. وحين يحدث أن ينهض ليتكلم، كان يفعل ذلك بطريقة اعتذارية، معترفًا بأنه ربما لم ينعم النظر في ميكانيكا الكم بما يكفي للثقة فيما كان يقول.

على ذلك، جعل حضوره محسوسًا. أثناء تناول وجبات الطعام، في الساعات التالية للاجتماعات، وفي أوقات متأخرة من الليل، كان يرغم أشياع ميكانيكا الكم على الإفصاح عن معتقداتهم، ويلح عليهم بتحفظاته - البدهية، والفلسفية، التي لم تكن عقلانية كلية، وإن ظلت تحوز أهمية. كان هناك سوء فهم يستبان أحيانًا، حين يفشل أشياع معسكر ما في استيعاب اعتراضات معسكرات أخرى. في إحدى المناسبات، قام باول إهرنفست [Paul Ehrenfest]، وهو أحد تلاميذ بولزمان السابقين وصديق مقرب لأينشتين، بكتابة فقرة من سفر التكوين حول بابل على السبورة: "هناك بلبل الرب لغة كل الأرض". عبّر هايزنبرج وبولي عن عدم اهتمامهما بشكوى هذا العجوز القديم. لقد استمعا مراعاة لمشاعر الآخرين، لم يقولا الكثير، غير أنه كان يمكن سماعهما يغمغمان لنفسيهما أنه لا مدعاة للقلق، وأن الأمور سوف تكون على ما يرام.

من منحى آخر، لم يكن في وسع بور، بسبب احترامه الشخصي لأينشتين ولأنه

منغمس أكثر مما يجب في المسائل الفلسفية، أن يتغاضى عن اعتراضات صديقه القديم. لقد كان هو من اضطلع بمهمة الدفاع عن ميكانيكا الكم، كما لو أن الآخرين لم يروا حقيقة أنها في حاجة ماسة إلى الدفاع عنها. وقد اعترف بور في محادثة خاصة أنه لم يفهم كلية ما يعترض عليه أينشتين بقوة.

استخدم أينشتين إحدى أدواته المفضلة؛ تجربة ذهنية. لقد طلب من زملائه تخيل شيء غاية في البساطة. سألهم أن يتفكروا في شعاع من الإلكترونات يمر عبر ثقب صغير في شاشة معتمة. لأن للإلكترونات خصائص موجية، سوف تخلق، على شاشة ثانية وضعت خلف الأولى لتسجل صورة، ما يسمى بنمط الحيود، حلقات مضيئة أحيانا ومعتمة أخرى. (كانت هذه الظاهرة، التي تنبأ بحدوثها للضوء العالم الفرنسي أوغسطين فرسنل [Augustin Fresnel] في بداية القرن التاسع عشر، إحدى الشواهد الحاسمة على النظرية الموجية في الضوء).

يفترض أنه لا يتسنى لميكانيكا الضوء سوى التنبؤ باحتمال أن يصطدم كل إلكترون بالشاشة في موضع أو آخر. الإلكترونات الفردية التي تمر عبر الثقب وتوزع نفسها بطريقة احتمالية سوف تنشئ بالطريقة الواجبة والمستقلة نمط الحيود اللازم. ولكن أينشتين يحثنا على التفكر في إلكترون مفرد. ما أن يصطدم بالشاشة في موضع ما، حتى يتعين أن يكون احتمال اصطدامه بموضع آخر صفرًا. يتعين على الدالة الموجية أن تتغير فجأة كي تسجل الوضع الجديد. هل هذا يستلزم، فيما يجادل أينشتين، أن شيئا يحدث مباشرة عبر الشاشة أثناء لحظة الصدام؟

هذا لب ما أصبح يشكل اعتراض أينشتين المتواتر على ميكانيكا الكم. إنه يستلزم اتصالاً يفوق سرعة الضوء، رغم أنه ما يتم توصيله يصعب سبر غوره. لسوء الحظ، فإن التصور المهم الوحيد للنزاع بين أينشتين وبور هو الذي كتبه بور نفسه، بعد مرور حوالى عشرين سنة. في هذا التصور نجد لمحات محيرة من حجة أينشتين، يتبعها رد بور المفصل، الذي يخطئ بيت القصيد.

لأن أينشتين لم يستطع قبول الظواهر الأسرع من الضوء، أقر (فيما يقول بور) على أنه ربما لم تكن ميكانيكا الكم قد روت القصة بأكملها. يتعين أن تكون هناك وسيلة، ضمن نظرية أعظم من ميكانيكا الكم، لحساب سلوك الإلكترونات بالتفصيل بحيث يتسنى التنبؤ بدقة بمآل كل منها. في تلك الحالة، سوف يكون الاحتمال الكامن في ميكانيكا الكم شبيها بالاحتمال الكامن في النظرية الحركية في الحرارة. هناك لدى الذرات خصائص محددة في كل وقت، وهي تسلك، في النظرية، بطريقة قابلة للتنبؤ على نحو مطلق. غير أنه ليس في وسع العالم الفيزيائي أن يأمل في معرفة ما تقوم به كل ذرة، ولذا فإنه مرغم على الركون إلى الوصف الإحصائي. يتعين على ميكانيكا الكم أن تعمل بالطريقة نفسها، فيما أكد أينشتين. يجب أن تكون في الأعماق حتمية بالطريقة الكلاسيكية. لن يكون تدخل الاحتمال مؤشرًا لانهيار أساسي في الحتمية الفيزيائية؛ إنه ينبئ فحسب بأن علماء الفيزياء لم يفهموا بعد الصورة الكاملة.

طرح بور حجة مضادة باستخدام مبدأ الريبة حديث التشكل لإثبات أنه لا سبيل لاستخلاص المزيد من المعلومات حول الإلكترونات في تجربة أينشتين الذهنية ـ دون تقويض نمط الحيود أثناء القيام بذلك. تستطيع الحصول على تفاصيل عن مسار كل إلكترون قبل اصطدامه بالشاشة، أو تستطيع الحصول على نمط الحيود، لكنك لا تستطيع إنجاز المهمتين معًا.

لا يصعب تخيل حالة السخط التي سببها هذا الرد لأينشتين. بالطبع ليس في وسع ميكانيكا الكم أن تعطيك كل المعلومات التي ترغب في الحصول عليها. تلك على وجه الضبط هي المشكلة التي أراد أينتشين كشف النقاب عنها. ولكن عوضًا عن تقويض المشكلة، قام بور بتعزيزها. يستحيل أن تكون ميكانيكا الكم قد روت القصة بأكملها.

ثمة رسالة كتبها إهرنفست بعيد اللقاء السولفي تصور المسالة بأسلوب حماسي موجز. لقد قال، "إن أيشتين، كما في لعبة الشطرنج، كان جاهزًا دائمًا بحجج جديدة. كان بور يخرج دومًا من سحابة دخان فلسفية أدوات يقوض بها المثال تلو الآخر.

أما أينشتين، فإنه كان كل صباح، كما في لعبة عفريت العلبة، يطلع [في وجوهنا] ثانية. أوّاه، لقد كان ما حدث ذا قيمة لا تقدر". تكدر إهرنفست من رؤية أينشتين يتحدث عن ميكانيكا الكم بطريقة منافية للعقل، بالطريقة ذاتها التي تحدث بها نقاده عن النسبية، وقد أخبر بذلك أينشتين نفسه. غير أنه اعترف بعد ذلك بأن عدم رضا أينشتين جعله يشعر بالقلق. ورغم أنه كان في جانب بور، لم يستطع مقاومة الشكوى من "معجم تعاويذ بور المريع [الذي] يستحيل على أي شخص آخر تلخيصها".

لم يتذكر مشاركون آخرون اللقاء بمثل هذه الطريقة الدرامية. مثال ذلك أن ديراك، الذي كانت رؤاه متعاطفة إلى حد كبير مع أينشتين، علق ببرود قائلاً: "لقد استمعت إلى حججهم، لكنني غير أنني لم أشترك فيها، أساسًا لأنني لم أكن مهتمًا إلى حد كبير. لقد كنت أكثر اهتمامًا بالحصول على المعادلات الصحيحة." وكما قال في مناسبة أخرى، "إن التتام لا يؤمن لك أية معادلة لم يسبق لك الحصول عليها."

لم تجلب مواجهة اللقاء السولفي الخامس السعادة لأينشتين ولا لبور. لم ينجح أي منهما في إيصال وجهة نظره للآخر. في معظم الأحوال، كان هايزنبرج وبولي يقفان في جانب واحد. بعد فترة طويلة زعم هايزنبرج أن اللقاء السولفي كان مهما لتشكيل رؤية مجمع عليها في ميكانيكا الكم، رغم أنه اعترف، بعد أن اضطر إلى التفصيل، بأن الإجماع تشكل من بور، وبولي، وهو نفسه. في محاضرة ألقاها في شيكاغو عام 1929، تحدث بإعجاب عن تأثير بور وعن derKopenhagener Geist - روح كوبنهاجن. عند كل من الأشياع والخصوم، كان تأويل كوبنهاجن بلورة للرؤية القياسية في ميكانيكا الكم. لقد ظل هذا التأويل عبر العقود مراوغًا بقدر ما كان مؤثرًا. أشياعه يتحدثون عن عمقه وقوته، في حين يسلمون بالعجز عن التعبير عنه بالكلمات. هذه على وجه الضبط هي المشكلة، فيما يقول نقاده. لقد حصل على سلطة الأمر الواقع، رغم أنه لم يبد أن هناك من يستطيع أن يحدد ماهيته.

لم يكن روع أينشتين قد هدأ بعد. بعد مرور عام على اللقاء السولفي الخامس، كتب بطريقة ساخرة لكنها مستسلمة إلى شرودنجر يقول "إن فلسفة - أو دين؟ -

هايزنبرج–بور المسكنة مشكّلة بطريقة حسنة لدرجة أنها تؤمّن للمؤمن الحق وسادة ناعمة لا يسهل عليه أن يستيقظ من عليها. لذا دعه يستلق". وبطبيعة الحال، من المفارق أن يعترض أينشتين على المبادئ الدينية التي يقول بها الآخرون، لأن سلطته في كره ميكانيكا الكم مستمدة من درايته المباشرة بأفكار "الكائن القديم".

الفصل الرابع عشر

الآن كسبت المباراة

قبيل نهاية صيف 1928، توقف في كوبنهاجن روسي صغير أكمل لتوه دورة صيفية في جوتنجن، آملاً في لقاء نيلز بور قبل عودته إلى لينينجراد. حين وجد وقت فراغ بعد الظهيرة، استمع بور باهتمام فيما كان هذا اليافع الطويل الرفيع، جورج جامو [George Gamow]، يشرح كيف أعد حلاً أنيقًا، وإن ظل غريبًا، لأحجية ظلت قائمة عهدًا طويلاً. سأله بور عن فترة مكوثه في كوبنهاجن، فأجاب بأنه مضطر للمغادرة في اليوم نفسه، لأن المبلغ الضئيل الذي سمحت به السلطات السوفيتية لرحلته قد نفد. سأله بور ما إذا كان سيقبل لو أنه استطاع أن يدبر له منحة لمدة عام من المعهد. تردد جامو قليلاً، ابتلع ريقه، ثم أبدى موافقته.

ما أسر انتباه بور هو تفسير جامو للأحجية القديمة المتعلقة بالانحلال الإشعاعي، اللغز الذي لاحظته ماري كوري منذ عهد مديد، عام 1898، والذي أثبته رذرفورد وسودي كميا عام 1902. لقد رأى جميعهم أن الانحلال يتخذ مسارًا اعتباطيًا: لدى أية نواة غير مستقرة احتمالاً ثابتًا، في وقت معطى بعينه، في الانحلال. ورغم أن هذه كانت أول حالة عينية في الفيزياء لظاهرة غير القابلة حقيقة للتنبؤ، لم تحظ مباشرة باهتمام علماء الفيزياء. حتى في عام 1916، حين لاحظ أينشتين أن القفزات الإلكترونية في ذرة بور تمتثل بدورها لقانون الاحتمال نفسه، لم يفهم علماء الفيزياء كلية أن ظاهرة جديدة ومربكة قد دخلت الساحة النظرية، ناهيك عن أن يفهموا مأتى أي ارتباط بين النشاط الإشعاعي والقفزات الإلكترونية.

حين قابل جامو بور، لم تكن الفيزياء النووية مفهومة إلا بقدر يسير. كان البروتون معروفًا، وكان هناك اعتقادًا متعاظمًا بأنه يتعين أن يكون لديه شريك محايد. لكن اكتشاف النيترون الذي أثبت صحة هذا الاعتقاد لم يتم إلا عام 1932. لم تكن لدى علماء الفيزياء فكرة عما يحفظ النواة متحدة: يتعين على النفور الكهرو – استاتيكي أن يجعل تراص حشد من البروتونات موجبة الشحنة، في حضور أو غياب رفقاء محايدين، يسبب تطايرًا فوريًا وتفككًا قويًا في النواة.

بالضرورة، لم يكن في وسع جامو سوى أن يخمن نموذجًا غاية في البساطة لنشاط ألفا الإشعاعي. لقد تخيل أن جسيمات ألفا، المعروف أنها متماهية مع أنوية ذرات الهليوم، موجودة مسبقًا في أنوية ثقيلة غير مستقرة، وقد افترض أنه مهما كانت طبيعة القوة التي تحافظ على اتحاد النواة، فإنها هي التي تحول دون ظهور جسيمات ألفا هذه معظم الوقت. برؤية هذه الصورة من منظور كمومي، خلص جامو إلى نتيجة مفاجئة ومرضية.

كلاسيكيًا، القوة القادرة على الحفاظ على جسيمات ألفا ضمن النواة سوف تحافظ عليها مثبتة إلى الأبد. تفكر في بلية تتحرك في صحن مسطح قليلاً. لو كان لديها طاقة كافية تخرجها من حافة الصحن، لخرجت في الحال؛ ولكن إذا لم تكن سرعتها كافية للوصول إلى الحافة، فإنها لن تخرج أبدًا. ثمة فرق واضح بين الحالتين.

غير أن جامو استخدم معادلة شرودنجر كي يصور أحد جسيمات ألفا داخل النواة بوصفها موجة كمومية عوضًا عن جسيم يفهم بالطريقة التقليدية. لقد وجد أنه يستحيل على هذه الموجة، لأسباب رياضية، أن تختفي فجأة في تخوم النواة. يتعين أن تأخذ سبيلها إلى الخارج، أن تنتشر في المدى المتاح. ولكن إذا كانت الموجة موجودة خارج النواة، فيما لاحظ جامو، فإنه يتعين أن يوجد احتمال يمكن قياسه في أن يكون الجسيم خارج النواة. وفق تحليل جامو الكمومي، يستحيل أن يوجد جسيم ألفا قصرًا وتحديدًا في النواة.

بتعبير آخر، لدى جسيم آلفا احتمال مثبت وثابت في الظهور خارج النواة ـ وإذا حدث أن خرج، سوف يهيمن النفور الكهرو – ستاتيكي ويرسل به بعيدًا. إن نموذج جامو البسيط لم يوفر فحسب سببًا لحدوث انحلال جسيمات ألفا؛ بل فسر أيضًا قانون الاحتمال الذي اكتشفه رذرفورد وسودي قبل ربع قرن.

قبل وصوله إلى كوبنهاجن، كان جامو قد بعث ببحثه للنشر. تصادف أن عالمين فيزيائيين أمريكيين، إدوارد كندون [Edward Condon] وررونالد جرني [Ronald Gurney]، أفكرا بشكل مستقل في المقترح نفسه ونشر أعمالهما أيضًا في عام 1928.

عادة ما يستشهد بنموذج انحلال ألفا على أنه أول مثال على ظاهرة كمومية عامة تعرف بشق الأنفاق: يمكن لجسيم ألفا أن يتسلل عبر ما يعد وفق النظرية الكلاسيكية حاجزًا مانعًا خلقته قوة مقيدة. غير أن "شق الأنفاق" محاولة معيبة لترجمة ظاهرة مستحيلة كلاسيكيًا إلى لغة مألوفة. إنها تقترح صورة جسيم يتحرك في سجنه، إلى أن يتزحلق، تلقائيًا، عبر الجدار ويتحرر. بلغة كمومية خالصة ـ تتسق مع موجات شرودنجر أو ريبة هايزنبرج ـ ليس لدى جسيمات ألفا الموضع أو كمية الحركة المحددة التي تضمّنها الصورة الكلاسيكية. بدلاً من ذلك، فإنها تقر نوعًا من الوجود المستمر، وإن ظل ضئيلاً، خلف حدود النواة.

من شأن هذا أن يثير سؤالاً دقيقًا. إذا كان لدى جسيم ألفا في كل الأوقات احتمال بعينه في الوجود خلف نطاق النواة، فلماذا يتزحلق بعيدًا في لحظة بعينها دون أخرى؟

"كيف يقرر الإلكترون؟"، أو هكذا كان يسأل رذرفورد بور طيلة الأعوام الماضية، بعد أن فشل في فهم كيف يتسنى له أن يقفز من مدار إلى آخر في لحظة بعينها. وها هو السؤال يثار ثانية في حالة انحلال ألفا. كيف تقرر الأنوية موعد انشطارها؟

يبين تصور جامو في انحلال ألفا أن الإجابة عن هذين السؤالين واحدة. أو بالأحرى أن السبب في عوز الإجابة واحد. ميكانيكا الكم لا تعطي سوى احتمالات. هذا كل ما هنالك. أن تطلب تنبؤًا محددًا لزمن أو موضع شيء سوف يحدث هو أن تطلب شيئًا ليس بمقدور ميكانيكا الكم تلبيته. كلاسيكيًا، حين يحدث شيء، يتعين أن يكون هناك سبب مباشر. في ميكانيكا الكم، لم تعد هذه القاعدة الموقرة عبر الزمن وبادية الوضوح قابلة لأن تنطبق. لا تصعب رؤية لماذا اعتبر أينشتين هذا قبولاً بالهزيمة عوضًا عن أن يكون تفسيرًا مرضيًا.

كان عمر جامو آنذاك أربعة وعشرين عامًا، وكان قد تخرج مؤخرًا في جامعة لينجراد. لقد تخلف بأعوام قليلة عن أيام ميكانيكا الكم البطولية، حين كان هايزنبرج، وشرودنجر، وديراك، والبقية، بترشيد بور اليقظ وتقصي أينشتين المرتاب، يجمّعون أجزاء الفيزياء الجديدة. عند جامو، كما عند كل علماء فيزياء الجيل الأخير، أمّنت ميكانيكا الكم مجموعة رائعة من الأدوات التي يستطيعون استخدامها في تناول كل أنواع الأسئلة التي لم يكن بالمقدور التفكر فيها. ليس فقط الفيزياء الذرية بل فيزياء البلورات والمعادن، فيزياء توصيل الحرارة والكهرباء، وفيزياء شفافية الضوء في مقابل عتمته ـ جميعها بدأت تستسلم لتبصرات كمومية. وحين وجد علماء الفيزياء أن هناك بابًا واسعًا من المشاكل العملية قد انفتح عليهم، لم يضيعوا وقتهم في المشاغل الفلسفية. كان حجم العمل كبيرًا، وقد وجدوا فيه الكثير من المتعة.

غير أن أينشتين، الذي لم ترق له إطلاقًا الحسابات التفصيلية للظواهر المركبة، لم يكن قادرًا على التخلي عن انشغالاته العميقة. لقد ظل في أعماقه شيء من المقاومة.

يذكر بور، بأسلوب قوي لا نألفه منه، أنه "في اللقاء التالي مع أينتشين في المؤتمر السولفي عام 1930، حدثت نقلة درامية في نقاشاتنا". كما في السابق، اجتمع ثلاثون من علماء فيزياء العالم المبرزين في بروكسل، لمناقشة موضوعهم الرسمي في تلك المناسبة: المغناطيسية. الموضوع الرسمي وأعمال المؤتمر الرسمية اختفت إلى حد

كبير من الكتب التاريخية، فلم تبق في الذاكرة سوى مواجهة أخرى، متوترة وعنيفة، حدثت بين أينشتين وبور.

بعد الجدل السولفي السابق الذي لم يخلص إلى نتائج حاسمة، لا ريب أن أينشتين قد لاحظ أن شكوكه الميتافيزيقية لن تجدي نفعا. لقد كان يحتاج إلى برهنة كمية محددة على وجود خلل ما، وعند وصوله إلى بروكسل، حسب أنه عثر عليها. لقد أراد أن يثبت لبور وحواريه أن مبدأ الريبة، المرحب به آنذاك بوصفه المبدأ الأساسي في ميكانيكا الكم، لا يشكل الحقيقة النهائية. لقد وجد طريقة للالتفات عليه، وسيلة لاستخلاص معلومات من التجربة تتجاوز ما تسمح به قاعدة هايزنبرج.

وبطبيعة الحال، لم تكن التجربة واقعية بل مثالاً آخر على أداة أينشتين المفضلة، التجارب الذهنية. كان اختبارًا لا سبيل لتخيل إجرائه في المعمل، لكنه متاح وفق قوانين الفيزياء. الأهم من ذلك، فيما حسب أينتشين، أن قوانين الفيزياء في هذه الحالة تثبت أن التجربة سوف تفضي إلى نتائج أفضل من تلك التي يسمح بها هايزنبرج. لقد كانت بسيطة حدًا حال دون التشكيك فيها.

يطلب أينشتين التالي: تخيل أن بعض الفوتونات موجودة في صندوق، وجهز الصندوق بمصراع يعمل بساعة. دع المصراع يفتح للحظة، في وقت محدد بدقة، بحيث يهرب فوتون واحد. زن الصندوق قبل وبعد. وفق E = mc2، سوف يحدد التغير في الوزن طاقة الفوتون الهارب. ثمة صيغة لمبدأ هايزنبرج تقول إنه كلما كان المرء أكثر دقة في قياس طاقة حدث كمومي ما، قلت قدرته على تحديد زمن هذا الحدث. في حجة أينشتين الجديدة، أو هكذا اعتقد صاحبها، لا ينطبق هذا القيد. بمقدوره أن يقيس طاقة الفوتون الهارب، كما أنه يعرف زمن هروبه، وفي وسعه أن يقوم بكل من هذين القياسين بشكل مستقل، وبالدقة التي يشاء. هكذا أعلن أينشتين، ومشاعر الانتصار تغمره، أنه قادر على هزيمة مبدأ الريبة.

ليون روزنفيلد [Leon Rosenfeld]، عالم فيزياء بلجيكي سوف يصبح العام

التالي مساعدًا لبور في كوبنهاجن، لم يشترك بشكل رسمي في اللقاء السولفي، غير أنه جاء على أي حال إلى بروكسل كي يحضر النقاش. وصل إلى النادي الجامعي؛ حيث كان المشاركون، في الوقت الذي كان أينتشين المبتهج، "يتبعه جمع أقل شأنًا"، يعود من قاعة الاجتماعات. جلس أينشتين ووصف باستمتاع واضح تجربته الذهنية المناوئة لهايزنبرج "أمام كل أولئك المعجبين".

بعد ذلك وصل بور، الذي بدا تمامًا "مثل كلب تعرض للجلد ورأسه مشنوقة". تناول الغداء صحبة روزنفيلد، وعلماء فيزياء آخرين جلسوا معهم أثناء تناول وجبة الغداء. كان بور "مستثارًا بشكل سيئ، سيئ حقيقة"، وكان يصر على أنه يستحيل على أينشتين أن يكون محقًا، أن ذلك يعني نهاية نظرية الكم. غير أنه كان عاجزًا عن وضع إصبعه بشكل مباشر على موضع الخلل. بعد ذلك، في المساء، حاول متوددًا إقناع أينشتين بالطريقة نفسها، لكن أينشتين لم يعره انتباهًا.

في اليوم التالي، كانت الابتهاج يغمر بور هذه المرة. أثناء الليل خطر له أن أينتشين ارتكب خطأ مفارقًا حين أغفل نتيجة يقول بها هو نفسه في نظرية النسبية العامة. افترض، فيما قال بور، أن الصندوق الذي يحتوي على الفوتونات كان معلقًا بطريقة ما بميزان نابضي يقيس وزنه. في لحظة هروب الفوتون، سوف يرتد الصندوق، الذي نقص وزنه، قليلاً إلى الأعلى، بعيدًا عن الجاذبية. يترتب على هذا أمران مهمان. أولاً، سوف يسبب هذا الارتداد ريبة في قياس كتلة الصندوق، تترجم إلى ريبة في طاقة الفوتون الهارب المستنبطة. ثانيًا، وعلى نحو أكثر خفاء، سوف تنتج الحركة في الصندوق تغيرًا في معدل حركة عقارب الساعة. ذلك لأن الساعة تعمل، كما أثبت أينشتين قبل عقد ونصف، بمعدل متغير أثناء حركة عقاربها في مجال الجاذبية الأرضية.

شرح بور سعيدًا كيف أن نتاج حالتي الريبة هذين، في الطاقة والزمن، هو ما يقره بدقة مبدأ هايزنبرج. أما أينشتين، الذي كدره أن يرى أنه في توقه لإثبات خطأ هايزنبرج تغاضى عن النظرية الفيزيائية التي قال بها هو نفسه، فلم يجد سبيلاً أمامه

سوى التسليم بالهزيمة. لم يشعر بور بالارتياح الظافر. في تصور لاحق لهذه الوقائع، لم يصرح بأنه كان محقًا وبأن أينشتين كان مخطئًا؛ بل أكد قدرة أينتشين المستمرة على تحديد المواضع التي تتفارق فيها بشكل لافت الفيزياء الكلاسيكية عن فيزياء الكم. لقد أثنى على تأثير أينشتين في الدفع بعلماء ميكانيكا الكم - وكان يعني نفسه أساسًا - لتحديد خصائص وغرائب موضوعهم الذي ظل جديدًا.

وبصرف النظر عن أسلوب ثناء بور المهذب، تظل حقيقة أن الضربة القاضية التي استهدف بها أينشتين ميكانيكا الكم ومبدأ الريبة قد أخطأت هدفها، فلم تحدث ضررًا و لم تترك أثرًا. ورغم أن هايزنبرج، وبولي، والباقين لم يقوموا إلا بدور ضئيل في هذا النزاع الفكري، "كنا سعداء تمامًا وقد شعرنا أن المباراة كسبت الآن"، أو هكذا قال هايزنبرج لاحقًا.

بعد هزيمته في آخر محاولة لإثبات وجود خلل في ميكانيكا الكم، عاد أينشتين إلى شكواه القديمة والأكثر أساسية. قد تكون ميكانيكا الكم متساوقة منطقيًا - غير أنها لا تعبر عن الحقيقة كاملة. لقد أصر على أن المصادفة، والاحتمال، والريبة، إنما تنشأ عن قصور في فهم علماء الفيزياء للعالم الذي يحالون تصويره بنظرياتهم. إن حجج بور وهايزنبرج والباقين العابثة ليست في النهاية سوى مماحكات حول صعوبات يكمن حلها في موضع آخر. لقد ظل مقتنعًا بأن يومًا سيأتي نعثر فيه على نظرية أكمل، وسوف تسلم ميكانيكا الكم نفسها للتاريخ، رفقة العديد من الفروض الفاشلة.

أحجمت لجنة جائزة نوبل في علم الفيزياء عام 1931 عن منح جائزتها، لأنها لم تحزم أمرها بخصوص ما إذا كانت ميكانيكا الكم قد جاءت لتبقى. غير أنها، وبزخم ثقة مفاجئ، منحت تلك الجائزة العام التالي إلى هايزنبرج وحده، وفي عام 1933 منحتها مناصفة لكل من شرودنجر وديراك، ما ضاعف من إحساس بورن بالمرارة الذي لازمه طيلة حياته، شعوره بأن إعلانه عن دور الاحتمال في النظرية الكمومية لم يعترف به على نحو يؤهله للجائزة حتى عام 1954.

في تلك السنوات نفسها، في مطلع ثلاثينيات القرن الفائت، احتدمت الصراعات السياسية حدًا جعل مؤسسي ميكانيكا الكم شذاذ آفاق في أرجاء العالم. في بداية عام 1933 استولى أدولف هتلر على السلطة في ألمانيا عبر التلاعب ببنود دساتير فيمار واستغلال رضا خصومه. مباشرة، شرع النازيون في طرد اليهود من الإدارة المدنية والجامعات. أينشتين، الذي كان يهاجم لسنين بوصفه رمز العلم اليهودي وعدو الثقافة الألمانية، والذي سبق له أن أمضى كثيرًا من وقته في الترحال، قرر مغادرة برلين مرة وإلى الأبد. رغبت جامعة أكسفورد في توليه منصبًا لديها، وكذا فعل معهد كاليفورنيا للتقنية ومعهد الدراسات المتقدمة [Institute for Advanced Study] في برنستون الذي كان استحدث لتوّه. غير أنه فضل قضاء بعض الوقت في كاليفورنيا، التي سبق أن زارها وقد اعتبرها جنة. غير أنه مثل معظم المثقفين الأوربيين، وجد أمريكا رائعة، مفعمة بالنشاط، لكنها همجية بشكل أساسي. لقد كان يبجل، على طريقته، أمجاد الموروث والثقافة الألمانية ـ لا العسكرتارية البروسية، ولا الآرية الزائغة التي يتبجح بها هتلر؛ بل الثقافة الألمانية العميقة والخالدة في الموسيقى، والفلسفة، والعلم.

كان أينشتين في كاليفورنيا حين تولى هتلر السلطة، وقد أوضح أنه لن يعود ثانية إلى ألمانيا. رجع فترة قصيرة إلى أوربا، ولم يذهب إلا إلى السفارة الألمانية في بروكسل لتسليم جواز سفره والتخلي عن جنسيته. بحلول فصل الخريف من عام 1933 كان في برنستون؛ حيث ظل هناك إلى أن وافته المنية. لقد وفرت له برنستون الملاذ الهادئ، والتحرر من كل الأعباء التدريسية، والظروف المشابهة، أو هكذا أمّل مؤسسو المعهد، لمركز فكري راق وفق أفضل المعايير الأوربية.

في ألمانيا، ابتهجت الصحف برحيل أينتشين. إذا كان تخلى عن البلاد، فهذا لا يثبت سوى أنه ليس الرجل الذي ترغب فيه ألمانيا. بخلو الساحة من معظم اليهود البارزين، سوف يتسنى للنازيين الشروع في إكمال القائمة. في نهاية عام 1933، فيما يذكر بورن، جاء اليوم "الذي وجدت فيه اسمي في الصحف ضمن المطرودين لأسباب عرقية". بعد تطواف في أرجاء العالم، انتهى به المقام في أدنبرة. أما بولي،

الذي كان يهوديًا بحكم أصوله، وإن لم يكن يهوديًا بشكل رسمي، فقد كان آنذاك آمنا في زيورخ؛ حيث ظل هناك حتى نهاية حياته. لم يكن شرودنجر، الأستاذ في برلين، يهوديًا، غير أنه وجد الحياة في ألمانيا بغيضة على نحو متزايد. أمضى بضع سنين في أكسفورد، ثم تولى منصبًا في جراز بالنمسا، جزئيًا كي يتسنى له العودة إلى بلاده، والأهم من ذلك كي يستطيع العيش مع عشيقته، التي كانت زوجة عالم فيزياء آخر، وأنجبت له ابنة في أكسفورد. في الأثناء، كانت زوجته تعيش في فينا.

وحين ضم النازيون النمسا عنوة، عام 1938، فر شرودنجر ثانية. تولى منصبًا في معهد الدراسات المتقدمة [Advanced Studies] في دبلن، الذي أسس حديثًا تحت رعاية رئيس الوزراء الأيرلندي الذي تلقى تعليمه في مجال الرياضيات، إيمون دي فاليرا [Eamon de Valera].

فر الكثير من علماء الفيزياء اليهود الآخرين من ألمانيا، أقله حاولوا الهروب، فيما تدافع زملاؤهم في أماكن أخرى يبحثون لهم عن عمل، وهذه لم تكن مهمة سهلة لأن الحملة ضد – السامية لم تكن مجهولة خارج ألمانيا إلا بالكاد. ينضاف إلى هذا أن كثيرًا ممن حاولا الهرب كانوا يساريي النزعة. حتى أعوان أينشتين نصحوه بالتكتم على آرائه السياسية. لقد كتب وتحدث بأسلوب متعاطف مع ستالين والتجربة السوفيتية، وفي بعض المناسبات أبدى ملاحظات ساخرة حول السوقية والمادية الأمريكية. لم يكن كثير من الأمريكيين متحمسين لرؤية يهود متعاطفين مع الشيوعية يتدفقون إلى بلادهم.

وفق رغبته الجامحة في ترويج الثقافة الآرية وحماية ألمانيا من التأثيرات الأجنبية الهدامة، نجح هتلر خلال بضع سنين في تقويض منزلة ألمانيا المميزة في الفيزياء. لقد أصبحت الإنجليزية في علم الفيزياء لغة الاتصال المشتركة بين الناطقين بلغات أخرى. بعض علماء الفيزياء الألمان احتفوا علنًا بالتطهير العرقي لمهنتهم، مهما كان الثمن المباشر، في حين أسى بعض آخر منهم على ذلك دون أن تتسنى له أية معارضة تذكر.

أما ماكس بلانك، رغم أن النازيين روعوه، فقد اعتقد أن بمقدوره أن يبقى في برلين وأن يستخدم نفوذه في الحفاظ قدر الإمكان على تركة بلاده العلمية العظيمة.

في وقت أسبق، قبل أن يستقيل أينشتين رسميًا من أكاديمية العلم البروسية [Prussian Academy of Sciences]، ذهب بلانك لمقابلة هتلر، لإقناعه بأن طرد اليهود يلحق الضرر بالعلم الألماني. اهتاج هتلر وتوعد، لكنه وعد، فيما اعتقد بلانك، بألا يتعرض اليهود إلى أي خطر حقيقي. بدوره، حاول بلانك إقناع بورن وآخرين بالبقاء لأن "الزمن كفيل بفصل الغث عن السمين". وحين استبين أن أينشتين لن يعود، احتج بلانك في إحدى رسائله على أن الإسراف في شجب النازيين سوف يجعل حياة الباحثين في برلين عن حلول توفيقية صعبة. أما أينشتين، الذي كان دائما يعتبر بلانك روح الاستقامة، فقد وجد أن إيمانه بوجاهة الألمان قد فقد وتدًا آخر. لقد أصبح يقول إن بلانك "كان شريفًا 60 بالمائة فقط".

توخي الحذر هو الاستراتيجية الممكنة الوحيدة عند ماكس بلانك، الذي عاش ليندم على توقيعه على عريضة الحرب العالمية الثانية سيئة السمعة دفاعًا عن ألمانيا. كان أكبر سنًا وأكثر وطنية من التفكر في الرحيل عن وطنه، غير أنه أصبح من المستحيل عرقلة النازيين حتى بسبل بسيطة. لقد تعرض هو وآرنولد سمرفيلد، البروسي العجوز الذي طالما دافع علنا عن أينشتين وسخر من النزعة ضد – السامية، للهجوم من قادة حركة العلم الألمانية، الذين وصفوهما "باليهود البيض"، واعتبروهما أكثر مدعاة للسخط من اليهود الحقيقيين، لأنهما اختارا طوعًا دعم العلم اليهودي دون أن تكون لديهم أية أسباب وراثية.

فرنر هايزنبرج اسم آخر بارز في قائمة اليهود البيض. لقد التزم الصمت حيال المسائل السياسية، كعادته دائمًا، غير أنه دافع بقوة عن النسبية وميكانيكا الكم، الهاجسين الأساسيين عند الراغبين في استعادة الصيغة الآرية من الفيزياء. بيد أن موقفه من هتلر ظل غامضًا، وهذا تعبير لين قدر الإمكان. لقد اعتبر هتلر ديماغوجيا فظًا يقود عصابة من السفاحين الجهلة، وفي الوقت نفسه تعاطف إلى حد مع فكرة أن

ألمانيا في حاجة إلى قيادة قوية لاستعادة كبريائها وقوتها. بعد زيارة إلى ألمانيا في أيام حكم هتلر الأولى، عاد بور إلى كوبنهاجن يبلّغ عن رأي هايزنبرج المعبر عنه بعبارات رقيقة بأن الأمور ليست سيئة كلية، بعد أن قضى الفوهرر على الشيوعيين والمتطرفين غير الوطنيين.

وعلى أي حال، كم سيستغرق حكم هتلر؟ خلال سني حياة هايزنبرج، كانت الحكومات الألمانية تجيء وتغدو، كما كانت كل حكومة بهشاشة وعناد سابقتها. لم يكن هايزنبرج وحيدًا في قائمة الذين يفكرون بعقلانية - الناس غير المبالين، غير المهتمين - والذين يرون أن هذه الفوضى سوف تنسف نفسها قبل أن تلحق بالبلاد ضررًا كبيرًا.

حتى الآن، ازدراء هايزنبرج السياسة أعانه بطريقة جيدة. ثم أن طرد اليهود وفر بعض فرص العمل. لقد عبرت جوتنجن عن رغبتها في انضمامه إليها، كي يحل محل بورن. حاول سمرفيلد أن يأتي به إلى ميونخ. غير أن أجهزة السلطات أجهضت في الحالتين على الانتقالات المقترحة. لم يكن هايزنبرج واحدًا منهم. لقد عبر عن تحفظاته بلغة منتقاة، من أن علماء الفيزياء الجيدين قد أكرهوا على الرحيل، غير أن احتجاجه الذي كان يبثه في جلساته الخاصة إلى طبقة الموظفين لم يحدث تغييرًا في السياسات العامة، بل جلب عليه تأنيبًا رسميًا. وما أن تعرض للتأنيب حتى التزم الصمت. في عام 1935 وقع وثيقة أقسم بموجبها على ولائه لحكومة هتلر، وهذا ما كانت تشترطه الإدارة المدنية. استشار بلانك في الاستقالة احتجاجًا. غير أن هذا لن يعني، فيما أخبره بلانك، سوى أن نازيًا مخلصًا وعالمًا فيزيائيًا أقل شأنًا سوف يحل بديلاً عنه. على المدى الطويل، أفضل لألمانيا أن يبقى ويبذل ما في وسعه.

لكن هذا لم يسفر في النهاية عن أي جديد.

الفصل الخامس عشر

خبرة حياة لا خبرة علم

حين نجح هتلر في تشتيت مواهب العلماء الألمان في أرجاء العالم، كانت ميكانيكا الكم قد أصبحت عالمية. لم تكسب دولة من نفي المثقفين اليهود قدر ما فعلت الولايات المتحدة؛ ولكن العلم الأمريكي كان مستواه رفيعًا أصلاً. كان العلماء الأوربيون يعبرون الأطلنطي حتى قبل عام 1914، وقد تعاظمت حركتهم هذه حين هدأت التوترات السياسية بعد الحرب. لقد اعترفوا صراحة بأن مشاريعهم الأمريكية قد جلبت عليهم مبالغ مجزية، ولكن بمرور الوقت، لم تصعب عليهم ملاحظة براعة جمهورهم المتنامية. في الأثناء، سافرت جماعات من الأمريكيين الشبان إلى أوربا لتعلم الفيزياء الجديدة ـ اكتشف زائر أمريكي لجوتنجن عام 1926 أن أكثر من عشرين من مواطني بلاده قد سبقوه إليها ـ ولكنهم كانوا دائمًا يرغبون في العودة لتأسيس معاهدهم الخاصة.

تعاظم ثانية أثر بريطانيا في الفيزياء النظرية، رغم أن الأمجاد التي حققتها في القرن التاسع عشر لن تستعاد ثانية. كانت اللغة الإنجليزية الأمريكية قد حلت محل الألمانية لغة عالمية للفيزياء النظرية، فيما أسهمت فرنسا، عبر لوي دي بروجلي، في ميكانيكا الكم، رغم أن الفيزياء الفرنسية بوجه عام قد انحسرت منذ أيام بيكويريل وبونكاريه وآل كوري.

بتعبير آخر، اتخذت قيادة العلم مسارات مختلفة عابرة للحدود الوطنية. لقد انتقلت من إنجلترا إلى ألمانيا في بداية القرن العشرين، توقفت وهلة في ميونخ وجوتنجن، وصلت إلى كوبنهاجن، ثم مرت سريعًا بكيمبردج مرة أخرى، قبل أن

تنتقل إلى كيمبردج الأخرى، وشيكاغو، وبرنستون، وباسادينا. ولعل تدخل هتلر السافر قد عجل ما كان أصلاً اجتياحًا قاريًا متصاعدًا. إن مدارس العلم، كمدارس الفن أو الموسيقى، لا تمكث في مكان واحد فترة طويلة.

على ذلك، من اللافت أن هذا القدر الكبير من ميكانيكا الكم قد ظهر في ألمانيا خلال فترة دخيلة ومحفوفة بالمخاطر من تاريخ البلاد. لقد اكتسبت الفترة الفيمارية، وفق ما نرى الآن، مسحة غريبة، كما لو أن حساسية غريبة استقرت عقدًا من الزمان في ألمانيا فاترة الإحساس، ثم رحلت عنها ثانية. تلك كانت ألمانيا السخط والفوضى المدنية، الحركات المجنونة قصيرة الأمد، ألمانيا النوادي الليلية والكباريهات، ألمانيا برتلوت بريخت [Bertolt Brecht] وفرتز لانج [Fritz Lang]، ألمانيا الواقعية الاشتراكية متثاقلة الخطوات، ألمانيا باوهاوس [Bauhaus] محبة التقنية [مدرسة فنية أكدت ضرورة استيعاب التقنية جماليًا قدر ما احتفت بالأشكال المعمارية البسيطة]. لقد كانت ممسوسة ومتنافرة. كان الفنانون ينتقلون من هاجس إلى آخر، يقوضون الماضي دون هوادة، حتى لو لم يمض عليه سوى ستة أشهر. كانت السياسة متداعية والفنون متقلبة، فيما كانت الحياة المدنية غير واثقة وفي بعض الأحيان يائسة. وعلى حد تعبير نيتشه، الوفرة ليست وليدة البهجة، بل وليدة التعاسة.

حتى في الفيزياء، كان ذلك زمن الاضطراب. لقد أطاحت قاعدة الاحتمال الجديدة بنظام الحتمية القديم، وكانت الأفكار تظهر وتختفي خلال سنوات، أحيانًا خلال شهور. الفيزياء الكلاسيكية أفضت إلى نظرية الكم، التي أثمرت ميكانيكا الكم، التي أفرخت الريبة. لا غرو إذن أن بعض المحللين من ذوي التوجهات العلم-اجتماعية قد تساءلوا عما إذا كان هناك ارتباط أعظم من المصادفة بين اضطراب الفيزياء الجديدة والتقلب الاجتماعي والفكري الذي شهدته المرحلة. هل تسلل مزاج ألمانيا فيمار الفوضوي إلى التفكير العلمي وعزز ظهور الريبة؟

عادة ما يسخر العلماء من مثل هذه المقترحات. سوف يقولون إن الفيزياء تباشر أعمالها لأسبابها الخاصة. للريبة الكثير من الأصول والمقدمات، من النظرية الحركية

إلى النشاط الإشعاعي إلى أطياف الأجسام المتوهجة. تصعب رؤية أي تأثير للفن أو السياسة في هذا. العلماء الذين طوروا فكرة الريبة كانوا في معظم الأحوال لا مبالين سياسيًا وتقليديين فنيًا. لقد كان هايزنبرج وبورن، فيما يتعلق بالبيانو والكمان، يفضلان عزف موسيقى بيتهوفن، فيما كان أينشتين يفضل موزار. بور لم يكن يحفل بالموسيقى أصلا؛ بل كان يمارس لعبة كرة القدم وكرة التنس ويجيد التزلج. أما بولي فقد كان يحبذ الرجوع إلى البيت متأخرًا، لكنه لم يكن يمضي وقتًا طويلاً مع الفنانين والموسيقيين، وكان يعتز بكونه لا يقرأ الصحف.

ولكن، مهما حاول الفيزيائيون الألمان في تلك الفترة، ما كان بمقدورهم العيش في عزلة نسوكية عن العالم المحيط بهم. لقد عانوا من نقص في الأموال والطعام، وشاهدوا العنف يمارس في الشوارع. ولأن المناصب الجامعية كانت في يد الإدارة المدنية، لا شك أنهم كانوا يدركون ولو إلى حد أن الحكومة تتغير بين الحين والآخر، وأنها كانت تطبق سياسات مختلفة تؤثر في البحث والتعليم. ربما تكون أفكارهم على مستوى آخر، لكنهم كانوا يقطنون عالمًا واقعيًا.

وحتى إن يكن، فإنه من المخيب للأمل أن تجد مؤرخًا للعلم، بول فورمان [Paul Forman]، يقول: "إني مقتنع ... بأن حركة الاستغناء عن السببية في الفيزياء، التي انبثقت فجأة وازدهرت بشكل مرفه في ألمانيا بعد 1918، كانت في المقام الأول جهدًا بذله علماء فيزياء ألمان لتكييف محتوى علمهم مع قيم محيطهم الثقافي." في المقام الأول؟

مؤدى الحجة، المختزلة إلى جمل قليلة، هو التالي: أدى انهيار ألمانيا في الحرب العالمية الأولى إلى تحرر معمق من أوهام الماضي، الذي لا يشمل فحسب فن الحكم السياسي والمجتمع المشكل بطريقة صارمة؛ بل بمجمل روح الحتمية والنظام، المتجذرة في العلم. لقد نشأ في معارضة السبل القديمة نوع من نزعات الإحياء الرومانسية، يؤثر الطبيعة على الآلة، والعاطفة على العقل، والمصادفة على المنطق. إذا كان التاريخ، مثل العلم، حتميًا، وإذا كانت الحتمية قد أسفرت عن سقوط ألمانيا، لا ريب بداهة

في أن هناك حاجة ملحة إلى نوع مغاير من التاريخ. هكذا، فإن العلماء، تجنبًا لربطهم بالماضي المنبوذ وتملقًا للمناخ الفكري الجديد، تخلوا بدورهم عن الحتمية وتقدموا تحت راية المصادفة، والاحتمال، والريبة. حسب فورمان، "يتعين وفق ذلك تفسير جاهزية وتوق الفيزيائيين الألمان لإعادة تشكيل أسس علمهم على أنه استجابة لمنزلتهم السلبية".

وبطبيعة الحال، لن يعترف أي عالم فيزياء بأنه اقترح نظرية متطرفة جديدة امتثالاً لتيار اجتماعي عابر. يتعين أن يكون التأثير، إذا كان ثمة تأثير، خفيًا، غير مدرك، لا يقدر على تمييزه سوى مؤرخ ذي دربة وقدرة فائقتين على الملاحظة.

صحيح أن بعض العلماء استجابوا علنًا للنظام المتغير الناجم عن انهيار ألمانيا. لقد أيد بلانك صراحة استثمار العلم سبيلاً لاستعادة بلاده شرفها وإنقاذ سمعتها الدولية. غير أن بلانك اشتهر أيضًا بعدم تحمسه لمضامين ميكانيكا الكم الأعمق. وفق رؤيته، تنهض قوة العلم وقدرته على التحمل بشكل دقيق على الأسس الحتمية المحكمة التي تشكلت في القرن التاسع عشر، وفيما اعتقد بلانك فإنه في وسع العلم الألماني أن يثبت قيمته عبر تأكيد تلك الصلابة بتعبير آخر، فإنه بمقدور العلم أن يحدث تأثيرًا محمودًا ومهدئًا عبر مقاومة الضغوط القائمة والتشبث بالمعايير القديمة - وهذا هو النقيض الدقيق للحكم بضرورة أن يعدل العلم مبادئه كي يغلّب مصالحه في عالم متقلب.

لا جدال في أنه كان هناك في ألمانيا ما بعد الحرب تيار يركن إلى نزعة ضد ثقافية تأسّلية [موروثة تخلت عنها الأجيال السابقة مباشرة] استهدفت الرؤية العلمية الفاترة والمسرفة في العقلانية في العالم. ولكن هذه الفلسفة، مثل أي شيء آخر في ألمانيا فايمر، لم تكن متساوقة؛ بل عبرت عن اندفاعات متخبطة. لقد كان الشبان في حركة Pfadfindern المحببة إلى قلب هتلر، يتجولون في التلال والغابات، منتشين بعجائب الطبيعة ويجادلون دون توقف حول معنى الحياة. "إن مثل هذا التفكير"، فيما يقول مؤرخ الثقافة بيتر جي [Peter Gay]، "لا يعني سوى اتخاذ قرار بجعل

المراهقة نفسها أيديولوجيًا". وعلى أي حال، كانت حركة Pfadfindern جماعة متنوعة. بعضهم كانوا اشتراكيين أرادوا خلق عالم مساواة جديد؛ بعض آخر مالوا شطر اليمين، يتطلعون إلى استعادة ألمانيا القديمة، حيث يعرف كل مكانه. لم يزعج هايزنبرج ورفاقه أنفسهم كثيرا بالسياسة المعاصرة، بل كانوا يتحسرون عليها جميعها. خلال سيرته العلمية المبكرة، حين كان يصوغ نظرية رياضية جديدة ومبدأ الريبة، كان هايزنبرج يفضل أحيانًا التجول صحبة الأصدقاء بين الجبال والبحيرات. عنده، كان ذلك تجديدًا للنشاط، هروبًا من محن الحياة اليومية، وخلال تلك الجولات، كان مبلغ ما يريد هو الخلاص من المجتمع، وليس إصلاحه.

إذا كان لهذه النزوعات الرومانسية المبتسرة قائد فكري، أو زعيم روحي، فإنه أوزوالد اشبنجلر [Oswald Spengler]، الذي نشر في عامي 1918 و 1922 كتابين من عمله المكثف الوعظ–ذاتي The Decline of the West [سقوط الغرب] (بالألمانية Der Untergang des Abendlandes، سقوط الحضارة، وهذا عنوان أشد تأثيرًا وشؤمًا). كان اشبنجلر مدرسًا كدّ كل مساء في مراكمة تعليمه ومعارفه، التي كانت دون شك واسعة، في نظرية بانورامية شاملة في تاريخ العالم. يبدو أنه علّم نفسه كل ثقافة غامضة وقديمة تصادف وجودها في أي من أنحاء العالم الأربعة، فدرس واستوعب فنها، وفلسفتها، موسيقاها، ورياضياتها. كان محوره الرئيس هو القدر أو فكرة القدر. وفق رؤيته، يسير التاريخ في دورة عظيمة. الثقافات تنهض ثم تسقط، وأسلوبها في التفكير يقوى ويهن معها. العلم الحديث، الثقافة العقلانية، مجرد دورة أخرى في العجلة؛ ومآلها أن تسقط هي الأخرى.

يتعين أسلوب اشبنجلر في عرض قدر مفصل ومهم من الحقائق الغامضة، وما أن يبدأ القارئ في الموافقة، حتى يقفز اشبنجلر ببراعة إلى أحكام كبيرة بخصوص ما يتوجب عليها جميعها أن تعني. يصعب وصف العناء، والمهابة، والتحيز، والحمق السافر، الذي يميز مشروع اشبنجلر. تحفته الشؤومة والجبرية أصبحت في قائمة أفضل المبيعات. لقد وفرت للقراء الألمان عزاء في أن عجلة التاريخ سوف تدور ثانية، أن الدولة ـ والثقافة ـ التي سقطت، سوف تنهض ثانية. هذا هو القدر.

عند اشبنجلر، المسؤول عن المشاكل الراهنة التي يعاني منها العالم هو العلم، منذ اليونان القدماء وتبنيهم القدري للمنطق والهندسة. كان جوته بطله ونيوتن وغده الماكر. لقد كان جوته "يكره الرياضيات. ... عنده، العالم بوصفه آلية يتعارض مع العالم بوصفه كائنًا عضويًا، الطبيعة الميتة تتعارض مع الطبيعة الحية، والقانون يتعارض مع الشكل".

في مواجهة السببية العلمية المملة والضحلة، تقف قوة القدر التاريخية. الأولى مجرد حادثة عارضة؛ أما الثانية فتتضمن هدفًا. إن "فكرة القدر"، فيما يقول اشبنجلر، "تطلب خبرة حياة لا خبرة علم، قدرة على الرؤية لا قدرة على الحساب، العمق لا الذهن .. في فكرة القدر، تكشف الروح عن توق العالم، عن رغبته في النهوض إلى الضوء، وفي إنجاز وتحقيق ندائه الباطن".

قليل من هذا يذهب بعيدًا [يفي بالغرض]، وفي The Decline of the West فإنه يذهب بعيدًا حقًا [يسرف في المبالغة]. بتعبير بسيط، أسر اشبنجلر دلالة مفادها أن ثمة شيئًا خطأ بشكل موحش في وضع العالم، ولكن ثمة سبيل للخروج، يقوم فيه رفض العقلانية، والعلم، وبوجه خاص الحتمية باردة القلب، بدور كبير.

يصعب الحكم عما إذا كان اشبنجلر مؤثرًا حقيقة، وليس مجرد شخصية شهيرة. لقد تبنى النازيون موقفه من الثقافة التي تستعيد حيويتها وترفض الحداثة، ولكن بطريقة انتهازية ازدراها اشبنجلر نفسه. ليس في وسع أي عالم أن يحمله محمل الجد. لم يكن اشبنجلر يطلب نوعًا جديدًا من العلم، أكثر نعومة ورقة وأقل إلزامية من العلم القديم؛ بل كان ضد العلم في كل تجلياته.

يريد فورمان منا أن نعتقد أن العلماء قد رفضوا الحتمية والسببية وتبنوا الريبة والاحتمال استرضاء لكل ما افتتن به أولئك الألمان من نوع التفكير الذي يمثله اشبنجلر. غير أنه لا يستطيع أن يطرح شواهد حقيقية على هذا؛ بل يقتصر على إقرار أن ظهور الريبة يناسب مذهب العصر. أينشتين على أقل تقدير ألقى نظرة عابرة على

عمل اشبنجلر، وكتب إلى بورن حول خبرته: "في المساء يوافق المرء على ما يقترحه، وفي الصباح يتسم بخصوص هذه المقترحات ... إن مثل هذه الأشياء مسلية، وإذا حدث أن قال شخص في اليوم التالي وبشكل حماسي عكس ذلك تمامًا، فإن ذلك سوف يكون مسليًا أيضًا؛ أما الحق فلا يعرفه إلا الشيطان". لعل هذا أسلوب أينشتين في التعبير عن قول بور إنه يجد بعض الأفكار الجديدة "مثيرة جدًا".

الأهم من ذلك أن الريبة لم تنبثق فجأة بشكل نزوي في منتصف عشرينيات القرن الفائت. لقد كانت تتصاعد قبل عقد أو أكثر، تفرض نفسها على وعي العلماء المشكك. وحين قام الاحتمال والريبة بدورهما المركزيين في ميكانيكا الكم، حدث ذلك لأسباب عينية ومحددة. لم يكونا تغيرين نزويين في بنية النظرية الفيزيائية؛ بل حلولاً لمشاكل عميقة وعويصة أربكت علماء الفيزياء سنينًا.

ثم أنه ليس صحيحًا أن ميكانيكا الكم كان نتاجًا ألمانيًا كلية. لقد تعينت القيادة في شخص بور، وهو دنمركي معمق الفكر أعجب بالعلم الألماني لكنه لم يتحمس للدعوات الاستعلائية الرامية لإنقاذ الثقافة والروح الألمانية. أما الإسهامات الحاسمة فقد قام بها ديراك في كيمبردج، وكرامر، وهو هولندي في كوبنهاجن، وبولي وشرودنجر، وكلاهما من فينا، ودي بروجلي، وهو أرستقراطي باريسي صغير.

ليس صحيحًا أيضًا الخطوط الخاطئة للسياسة والشخصيات التي تفصل بين رواد نظرية الكم ونقادها تتطابق بشكل رائع مع معتقداتهم العلمية. في المعسكر المناوئ للاحتمال نجد متعاطفين مع النازية من أمثال جوهانز ستارك، يمينيين تقليديين من أمثال ويلي فين، ومحافظين معتدلين من أمثال بلانك، صحبة الاشتراكي المجاهر باشتراكيته أينشتين، والأقل اهتمامًا بالقضايا السياسية شرودنجر. يمكن الجدل بأن الأخيرين هما أكثر الفيزيائيين بوهيمية على المستوى الشخصي، وفي هذا الجانب قد يكونان الأكثر تناغمًا مع روح فيمار المزعومة. غير أنهما قادا في الفيزياء الدعوة إلى استعادة النظام القديم. في الوقت نفسه، كان هايزنبرج، مستحدث الريبة، تقليديًا وسطحيًا في السياسة، متزمتًا ومروعًا في حياته الشخصية ـ بتعبير آخر، برجوازيًا

مكينًا ـ غير أنه في العلم كان مستعدًا لأن يضع الصرامة الرسمية جانبًا وأن يدع حدسه يقوده. أما بولي فيكاد يكون على النقيض منه. لم يكن يحفل بالشهرة و لم يكن يعني كثيرًا بالكياسة الاجتماعية، لكنه كما اعترف هو نفسه، يدع الحذر والخوف من المجهول يكبحان خياله العلمي. قبيل وفاته، عبر إلى شخص أجرى معه مقابلة عن أسفه من أنه رغم ظنه أنه كان مفكرًا حرًا في تلك الآونة، فإنه يلحظ الآن حين يتذكرها أنه "لم يكن ثوريًا بل كلاسيكيًا".

باختصار، كل هذه أجزاء لا سبيل لتركيب صورة كلية منها. يمكن تخيل أن الدور الكبير الذي قامت به ألمانيا في ظهور فيزياء الكم يرتبط بظهور نوع مكثف من النظريات الرياضية في تلك البلاد، في مقابل مدرسة الفيزياء البريطانية في القرن التاسع عشر التي كانت أكثر براجماتية. غير أنه لا يصعب العثور على أسباب تبدو أكثر اعتباطية من أن تكون محددة مسبقًا. إذا كان هناك حدث مبكر مفرد حاسم، فهو الافتتان المباشر الذي أظهره سمرفيلد بنسق بور الأصلي في أفلاك الإلكترونات في الذرة. لقد قام سمرفيلد بدوره بتدريب بولي وهايزنبرج وعدد كبير آخر من العلماء. في المقابل، لم يسمع ديراك عن ذرة بور إلى أن ذهب إلى كيمبردج بعد ما يقرب من عقد. هل لنا أن نقول إن الاهتمامات غريبة الأطوار التي استحاذت على المقاتل القديم آرنولد سمرفيلد، وليس الجانب الاجتماع – سياسي من حكومة فايمر، هي التي جعلت ألمانيا موقع رأس ميكانيكا الكم؟ ولكن في تلك الحالة إلى أية عوامل نفسية، واجتماعية، وسياسية نعزو حقيقة أن سمرفيلد استدرج على هذا النحو إلى ذرة بور، فيما ظل الكثير من علماء الفيزياء الآخرين حائرين أو رافضين؟

بتعبير آخر، هناك في ظهور الريبة في ألمانيا عامل مصادفة لا سبيل لاختزاله ينضاف إلى التيارات الفكرية التي يمكن تمييزها. في هذا الخصوص، التاريخ العلمي مثل التاريخ بوجه عام ـ ما لم يتكشف كله، كما يفضل اشبنجلر، عن فكرة القدر.

حتى إذا لم تلزم القوى اللاعقلانية العلماء بطرح الريبة في الفيزياء، فإنه من الملاحظ أن فكرة الريبة قد تم تبنيها بسرعة من قبل شخصية مبرزة واحدة على الأقل

لم تكن صديقة للعلم والمنطق. فقط بعد عام أو عامين من عثور هايزنبرج على مبدئه، دوّن د.هـ. لورنس [D.H. Lawrence]هذه القصيدة القصيرة:

أحب النسبية ونظريات الكم
لأني لا أفهم أيا منهما
وهما تجعلانني أشعر كما لو أن المكان تغير
مثل بجعة لا تستطيع التوقف
رافضة أن تجلس ساكنة وتقاس؛
كما لو أن الذرة شيء مندفع
يغير رأيه دائمًا.

كان لورانس معجبًا بالاندفاع أكثر مما كان مهتما بالعقل، ولذا أسعده أن العلماء فيما يبدو قد ذاقوا من زعاف سمهم. الجهود التي بذلوا في فهم العالم والتنبؤ به عبر نسق كامل من القوانين والقواعد أحبطت نفسها. لقد حصلوا الآن على قوانين تقول إنهم لا يستطيعون معرفة كل شيء، إن الزمان والمكان لا يعملان وفق أمانيهم. لا ريب أن لورنس يجد اشبنجلر الشخص ـ الأعزب المحنط والمنكب على نصوصه القديمة ـ مثيرًا للشفقة، يكاد لا يكون إنسانًا حقيقيًا إطلاقًا، وما كان له أن يعني كثيرًا بنسق التاريخ المسرف في التفصيل والتنظير الذي يعرضه اشبنجلر. على ذلك، في رؤية العلم الضبابية التي يقول بها هذان النمطان المتعارضان ثمة رابط ما. لقد رفض اشبنجلر الحتمية الفكرية المسرفة في الخيال التي أنتجها القرن التاسع عشر، فيما عادى لورانس عالم التقنية والصناعة بارد القلب (ولديه مبرر في ذلك، فقد عاش في منطقة كئيبة توجد بها مناجم للفحم في بريطانيا). بطرق مختلفة، يمثل العلم عندهما شيئًا لا إنسانيًا، مضعفًا ـ شيئًا تمت الآن الإطاحة به، أقله أصبح متداعيًا.

يتوجب حتى على العلماء أن يوافقوا على أن الحتمية الكاملة على الطريقة القديمة قد ذهبت إلى غير رجعة. هكذا قال بور، وقد توسع هايزنبرج في هذه الفكرة. غير أن العلم، خلافًا لرغبة اشبنجلر ولورنس فيما يتوجب أن يكون عليه العالم، لم يتوقف

فجأة عن العمل. ذلك هو اللغز الأكثر إثارة الذي طبقه بور بوجه خاص على نفسه. لقد قصد من لغة التتام التي يقول بها تأمين وسائل تمكن العلماء من الاستمرار في التحدث بعقلانية واتساق عما يقومون به، رغم أنه استبين أن ما يبدو أحد الدعائم الأساسية قد تصدع.

هذا ما جعل سؤال الريبة يبدو غاية في الإثارة والأهمية عند كثير من الناس خارج الأوساط العلمية. هل كان العلم معاقًا بشكل مميت؟ هل سيستمر رغم ذلك (وهذا فيما يبدو أمل معظم علماء الفيزياء الشبان، الواثقين على نحو مبتهج من أنه طالما ظل بمقدورهم إجراء الحسابات، سوف يظل في وسعهم ممارسة العلم كما كانوا يفعلون دائمًا)؟ أو أنه سوف يتغير، وإذا كان ذلك كذلك، فكيف؟

إن مثل هذه الأسئلة، وإن كانت آسرة عند الفلاسفة والشعراء، لا تقدح شرارة في الأغلبية العظمى من علماء الفيزياء الممارسين. غير أن بور وأينشتين، كالعادة، كانا استثناء. لقد أراد بور أن يبين كيف أنه بمقدور الفيزياء أن تستمر بضمير سليم، رغم تدخل الريبة. أما أينتشين فقد أراد أن يبين أنه ليس بمقدورها أن تقوم بذلك. وقد كان هناك أرنب أخير في قبعته، برهنة أخيرة على أن ميكانيكا الكم ليست الكلمة الأخيرة.

الفصل السادس عشر

إمكانات التأويل الواضح

قبل أن تصبح برنستون مقر إقامته الدائم، مكث أينشتين بضعة شهور أخيرة في أوربا، يقضي معظم أوقاته في بلجيكا وإنجلترا. في 10 يونيو من عام 1933، ألقى محاضرة في أكسفورد حول رؤاه في الفيزياء النظرية بوجه عام وميكانيكا الكم بوجه خاص. يتوجب على المنظِّر أن يولي اهتمامًا مكثفًا للأدلة الملاحظية والظواهر الإمبيريقية، فيما قال؛ غير أن هذا ليس سوى خطوة أولى. يتعين على العالِم، إبان تشكيل نظرياته، أن يعمل خياله كي يربط بين الحقائق في بنية متساوقة مشكّلة وفق قواعد الرياضيات والمنطق المحكمة. وبطبيعة الحال، فإنه وصل عبر هذا النهج منذ سنين إلى نظرياته في النسبية الخاصة والعامة.

قال أينتشين إن مؤدى مبدئه المرشد اعتقاد بأن الطبيعة تؤثر دائمًا الحل الأبسط. وهكذا فإنه يعتقد "بمعنى ما أن الفكر الخالص قادر على فهم الواقع، وفق ما حلم القدماء". غير أن هذا يميل به إلى فكرة خطرة. لقد أصر أينشتين حين كان يافعًا على أنه يتعين على منصة وثوب الخيال أن تثبّت في حقائق تم تقصيها بعناية فائقة. أما الآن، وقد تجاوز الخمسين، فيبدو أنه يقول إن الحدس والعقل وحدهما، وبمعزل عن الاعتبارات العملية الصرفة، قد يكفلان تحديد القوانين الطبيعية.

غالبًا ما تعرف البساطة في التنظير العلمي على أنها أناقة وجمال. غير أن هذا الشعور بالصحة الاستاطيقية [الجمالية]، أيًا كان اسمه، قد يكون مضللاً بقدر ما يكون مرشدًا. لدى بور آراؤه الخاصة في هذا الصدد. لقد قال مرة: "إنني لا أستطيع أن أفهم ما يعنيه وصف نظرية بأنها جميلة، إذا لم تكن صحيحة".

تحدث أينشتين في أكسفورد عن انزعاجه من ميكانيكا الكم ـ لأنها لا تنسجم مع ما أخبره به "الفكر الخالص" حول الطريقة التي يتوجب أن تكون عليها نظرية الفيزياء. لقد أصر أينشتين على أن تأويل بورن الاحتمالي للموجات الكمومية "لن يحوز سوى مغزى عابر". جادل أيضًا عن أنه في نظرية أفضل من ميكانيكا الكم، تستعيد الحوادث الفيزيائية موضوعيتها التقليدية ولن تعد مجرد تشكيلات من الإمكانات. من جهة أخرى، قبل أن يكون موضع الجسيم، بسبب مبدأ هايزنبرج في الريبة، عاجزًا عن إهابة أية دلالة مطلقة محددة. غير أنه لم يبين كيف تتم المصالحة بين هاتين الجملتين المتناقضتين.

ما أن استقر في برنستون حتى واصل أينشتين ترصد أخطاء ميكانيكا الكم. ليست هناك أدلة تشير إلى صدوع عملية تعاني منها الفيزياء الجديدة. غير أن شيئًا في أعماقه ـ ما يسميه بـ صوت "الكائن القديم" على حد تعبيره، الذي يوحي إليه وحده ـ أخبره بأن هناك خللاً خطرًا. لقد سبق له أن سمع هذا الصوت من قبل. فلماذا يتوجب أن يخذله الآن؟

في عام 1935، حين كان يعمل صحبة زميليه في برنستون الأصغر سنًا منه، بورس بودولسكي [Boris Podolsky] وناثان روزن [Nathan Rosen]، نشر أينشتين آخر وأشهر هجوم له على نظرية الكم. لقد تساءل البحث في عنوانه:
"Can Quantum–Mechnical Description of Physical Reality Be Considered Complete?"

["هل يمكن للوصف الكم–ميكانيكي للواقع الفيزيائي أن يكون كاملاً؟"] كان السؤال خطابيًا، ومن الواضح أن الإجابة كانت خلاف ذلك، وفق رأي أينشتين، وبودلسكي، وروزن [أ ب ر].

كانت حجة أ ب ر تفصيلاً فيما أقلق أينشتين بخصوص المؤتمر السولفي الخامس عام 1927. هناك كان ركز على إقرار بور أن مبلغ ما تستطيع دالة الموجة الكمومية

وصفه هو احتمال أن يكون الجسيم في موضع أو في آخر. هذا جد حسن، قال أينشتين، غير أنه يتعين أن يصبح الاحتمال في مرحلة ما يقينًا. في المثال الذي اختار، يتعين على الإلكترون الذي يصطدم بشاشة أن يصطدم بها في موضع واحد بعينه. وإذا كان ذلك كذلك، ألا يتوجب على الموجة الكمومية التي تصفه أن تتغير في الحال بطريقة ما في كل أنحاء الشاشة؟

لم يبد آنذاك أن ثمة أحدًا فهم ما يريد. لقد كانت الحجة في واقع الحال مبهمة وميتافيزيقية. غير أن أينشتين، وبودلسكي، وروزن يزعمون الآن أنهم استطاعوا جعل الاعتراض عينيًا، بعد أن أحالوه إلى مشكلة محددة يمكن البرهنة عليها. لقد جادلوا عن أنه بمقدورهم تحديد كيف تتعارض ميكانيكا الكم مع أحكام البداهة.

أولاً: في أسلوب أينشتين القديم والصحيح، تعين عليهم أن يوضحوا بشكل كامل ما تعنيه أحكام البداهة. لقد أقروا أنه يتوجب على أية نظرية مقبولة أن تتعامل مع ما وصفوه "بعناصر الواقع الفيزيائي"، التي تعني لديهم أشياء من قبيل الموضع وكمية الحركة، الأنواع التقليدية من الكميات التي يعتبرها علماء الفيزياء، وفق عادة مبجلة عبر العصور، معلومات لا خلاف عليها تتعلق بالعالم الفيزيائي.

حسن جدًا ـ ولكن ما الذي يشكل حقيقة عنصرًا في الواقع الفيزيائي؟ ليست هذه قضية سبق للعلماء أن أمضوا الكثير من الوقت في الانشغال بها. هكذا اقترح أينشتين وزميلاه تعريفًا صوريًا له، تعريفًا أصبح شهيرًا أو سيئ السمعة، وفقًا على منظور المرء. إذا استطعنا، فيما قالو، "دون إرباك النسق بأية طريقة، التنبؤ بيقين .. بقيمة الكمية الفيزيائية، فإن هناك عنصرًا في الواقع الفيزيائي يناظر هذه الكمية الفيزيائية".

تفكر مثلاً في موضع إلكترون أو كمية حركته. إذا كانت لديك طريقة في تحديد أي من هاتين الخاصيتين دون التأثير بأي حال في مسار الإلكترون أو سلوكه اللاحق، فإنه يحق لك أن تقول إن موضع أو كمية الحركة حقيقة مؤكدة، معطى لا سبيل لإنكاره. بتعبير آخر، عنصر من عناصر الواقع الفيزيائي.

بعد أن أعدوا الحجة على هواهم، شرع أينشتين وزميلاه في البرهنة على كيف أن ميكانيكا الكم تواجه صعوبات. لقد تخيلوا جسيمين يتحركان بالسرعة نفسها في اتجاهين متضادين بعيدًا عن أصل مشترك، بحيث إنك ما أن تقيس موضع أو كمية حركة أحدهما، حتى تعرف في الوقت نفسه موضع أو كمية حركة الآخر.

لقد سلموا أن الملاحظ الذي يقوم بقياس أحد الجسيمات سوف يتعرض للتضليل من قبل مبدأ الريبة. قس كمية حركته، ولن تعرف موضعه، أو العكس بالعكس، تمامًا كما أملى هايزنبرج. غير أن أينشتين، وبودلسكي، وروزن يلعبون الآن ورقتهم الرابحة. إن مفاد المشهد الذي أعدوا هو أن ملاحظة جسيم تخبرك شيئا عن الآخر، وهذا هو المكان الذي تبدأ تحدث فيه أشياء غريبة.

قس موضع الجسيم الأول، وسوف تعرف مباشرة وضع الآخر - حتى إن لم تنظر إليه مباشرة. أو قس كمية حركة الجسيم الأول، وسوف تعرف كمية حركة الآخر - مرة أخرى، دون النظر إليه. هذا يعني، فيما استنتجوا متلهفين، أنه يتعين على كل من موضع وكمية حركة الجسيم الثاني أن تكونا "عناصر في الواقع الفيزيائي". لأنه يمكن تحديد هاتين الخاصيتين دون إزعاج الجسيم المعني، يتعين أن يحوزا قيما محددة سابقة الوجود. يستحيل، فيما جادلوا، أن قياس الجسيم الأول لا يسبب إلا آنذاك تحقق خصائص الجسيم من ضباب كمومي - لأنه لم يحدث أي شيء حقيقة للجسيم الثاني.

المترتبة الأهم، فيما أضافوا، هي أن مبدأ الريبة المتبجح الذي يقول به هايزنبرج لا يعني، في النهاية، أن الخصائص الفيزيائية غير محددة بشكل أساسي إلى أن يتم قياسها. بدلاً من ذلك، فإن للجسيمات خصائص محددة، ومبدأ الريبة قبول لفكرة أنه ليس في وسع ميكانيكا الكم أن تصف بشكل كامل تلك الخصائص، ما يعني، وفق ما استخلص أينشتين ومساعداه، أن ميكانيكا الكم لا تروي القصة كاملة - تمامًا كما أكد أينشتين منذ زمن طويل. إنها ليست سوى نظرية جزئية، تصور غير كامل في الحقيقة الفيزيائية التحتية.

في كوبنهاجن، فيما يذكر ليون روزنفيلد مساعد بور، "نزل علينا الهجوم كالصاعقة. لقد تركنا كل شيء آخر، لأنه توجب علينا تبديد سوء الفهم هذا في الحال." لقد قال بور نفسه إن "بيان البحث وقوة حجته البادية ... خلقت بين الفيزيائيين موجة من القلق". أثنى شرودنجر على أينشتين في مشاركته الأخيرة، غير أن الآخرين كانوا جميعهم أقرب إلى الضيق منهم إلى الإعجاب. كتب بولي إلى هايزنبرج واصفًا بحث أ ب ر بأنه "كارثة"، رغم أنه كان كريمًا بما يكفي لأن يقول إنه كان له أن يعتبر كاتبه "ذكيًا وواعدًا تمامًا"، لو أنه كان طالبًا صغيرًا.

حث بولي هايزنبرج على الرد وتساءل ما إذا كان يتوجب عليه هو نفسه أيضًا "هدر بعض الحبر والأقلام" في محاولة إعادة الأمور إلى نصابها. الحال أنه عندما قامت The New York Times بنشر تحقيق تحت عنوان "أينشتين يهاجم نظرية الكم"، وجد المحقق عالم فيزياء أمريكيا وضع إصبعه على الصعوبة الكبيرة. لقد لاحظ إدوارد كوندون [Edward Condon] أنه "بالطبع يرتهن قدر كبير من الحجة بالمعنى الذي يعزي إلى كلمة "واقع"".

أعد هايزنبرج ردًا، غير أنه أوقف نشره حين علم أن بور هو الآخر كان يقوم بعمل مماثل، متخليًا لبور عن سلطته البابوية القديمة في قضايا الإعلان عن مسائل العقيدة. (زعم بور بعد سنوات، وعلى نحو غير مفاجئ، بأن رد هايزنبرج المقترح كان على أي حال يعاني من خلل).

وبطبيعة الحال، استغرق بور وقتًا طويلاً في إعداد الرد. صحبة مساعده روزنفيلد كان يتقصى بحث أ ب ر، مراجعًا جيئة وذهابًا الرد تلو الآخر. وكان يتوقف أحيانًا في وسط النقاشات المضنية ويتساءل "ما الذي يمكن لهم أن يعنوه من هذا؟ هل تفهمه؟" بعد أن أعد مخطوط الرد، وأعاد الاشتغال عليه، وعدل فيه مرارًا بطريقته المعتادة، نشر هذا الرد المركز بشكل مضن على أ ب ر بعد خمسة أشهر، كاشفًا عن الأستاذ الدنمركي في أفضل حالاته المسهبة والساخرة بشكل معيب. مفاد الرد، فيما يقول بور، هو أنه رغم كل الزخرفات الميتافيزيقية، لم يعثر أينشتين وزميلاه على

طريقة عملية في هزيمة مبدأ الريبة. حتى في المشهد الذي أعده أ ب ر، لا تستطيع حقيقة أن تستنبط في الوقت نفسه موضع وحركة أي من الجسيمين، بشكل مباشر أو غير مباشر. وهكذا، فإن مبدأ هايزنبرج، وفق أي معنى عملي، يظل قائمًا.

عوضًا عن ذلك، فيما يشرح بور، بدأت حجة أ ب ر بتعريف بعينه للواقع الفيزيائي، وبعد ذلك بينت أن ميكانيكا الكم لا تستوفي استحقاقات هذا التعريف. أو على حد تعبير بور، "فإن التناقض الظاهر لا يكشف حقيقة إلا عن خلل أساسي تعاني منه الرؤية المعتادة في الفلسفة الطبيعية للتصور العقلاني في الظواهر الفيزيائية من النوع الذي عنينا به في ميكانيكا الكم." حين يترجم هذا [إلى العربية] فإن هذا يعني أن أينشتين، وبودلسكي، وروزن اختبروا ميكانيكا الكم وفق معيار غير مناسب، فلا عجب أنهم وجدوها دون المستوى المطلوب.

من منحى آخر، هناك شيء طريف يبدو أنه يحدث في تجربة أ ب ر، وقد حرص بور على ألا يسرف في الدقة بخصوص ماهية ذلك الشيء الغريب. تحديدًا، تجنب تضمين ما يشي بأن قياس الجسيم الأول يسبب بطريقة ما قيام خصائص الجسيم الثاني، فورًا، باتخاذ قيمها المناسبة. بدلاً من ذلك، وكما قال في عبارة اشتهرت بغموضها، "هناك أساسًا مسألة تأثير في ذات الظروف التي تعرف أنماطًا ممكنة من التنبؤات المتعلقة بمستقبل سلوك النسق". يبدو أن هذا يعني، إذا كان يعني أي شيء، أن اختيار الملاحظ ما يقيس سوف يؤثر - قبل شروعه في القياس - في الطريقة التي تتكشف بها الجسيمات لاحقًا.

أما بخصوص تهمة عدم اكتمال ميكانيكا الكم، فقد سلم بور بأنه ليس في وسع الملاحظ أن يحصل على قدر المعلومات الذي يرغب في الحصول عليه عالم الفيزياء الكلاسيكي. غير أنه أكد أن ميكانيكا الكم تظل على ذلك قادرة على تأمين "توظيف عقلاني لكل إمكانات التأويل الواضح للقياسات، يتسق مع التفاعل المتناهي وغير القابل لأن يتحكم فيه بين الأشياء وأدوات القياس في مجال نظرية الكم". مرة أخرى، حين يترجم هذا فإنه يعني أن ما تعطيه ميكانيكا الكم هو كل ما سوف تحصل عليه.

حين حاول تلخيص جدله مع أينشتين بعد مرور خمس عشرة عامًا، في كتاب مقالات تذكارية، كان بمقدور بور أن يرى على أقل تقدير أنه ربما كان في وسعه أن يكون أكثر وضوحًا. "حين أقرأ تلك الفقرات"، قال معلقًا على رده الأصلي على أ ب ر، "أعي تمامًا عدم كفاءة التعبير، الأمر الذي صعب من تثمين التيار الذي كانت البرهنة تصبو إلى الكشف عنه ...". لقد كان بمقدور كاتب آخر أن يقول، صعب على الفهم، ولكن بور حتى حين يريد أن يقول شيئًا بشكل مباشر وصريح، لا يسعه سوى أن يتسلل على أطراف أصابعه حذرًا، منهيًا جملته بالقدر الذي يسعه من المواربات.

بيّن أن قول ما هو خطأ في حجة أ ب ر أيسر من العثور على طريقة واضحة في التفكر فيها. في جملة واضحة نادرة، قال بور إن ميكانيكا الكم تطلب "تخليًا نهائيًا عن فكرة السببية الكلاسيكية". ولكن إذا تم الاستغناء عن السببية والواقع، فما الطريقة البديلة التي سوف يفكر بها علماء الفيزياء؟ عن هذا السؤال، ليست لدى بور إجابة واضحة، باستثناء التوصية بمذهب التتام الذي يقول به، والذي يعني عمليًا تبني التناقض بدلاً من محاولة حله.

على ذلك، لم يسع أينشتين، حين رد على ملخص بور الأخير للخلاف بينهما، سوى التعبير عن الصعوبة القديمة التي وجدها في "مبدأ بور في التتام، الذي لم أستطع أن أصوغه صياغة دقيقة رغم الجهد الكبير الذي بذلته في ذلك". وفي هذا كان أينشتين في صف الأغلبية الصامتة من علماء الفيزياء الذين وجدوا بدورهم أن بور محيرا. بيد أن معظمهم تكتم على شكوكه. لقد اكتشفوا أنه لا يصعب كثيرًا استخدام ميكانيكا الكم دون الخوض في انشغالات فلسفية حول طبيعة الواقع الفيزيائي.

ولأنه لم يقتنع بما قاله بور، وكدّره عوز الاهتمام بل العداء الذي أبداه هايزنبرج وبولي والبقية، توسع أينشتين في عرض شكوكه بخصوص ميكانيكا الكم في رسائل بعث بها إلى شرودنجر، المتعاطف الوحيد ضمن من كان يتبادل معهم الرسائل. في إحدى الرسائل، تخيل قنبلة أعدت بحيث تنفجر استجابة لحدث كمومي غير متوقع.

إذا كان يصعب فهم المقصود من وضع كمومي يؤلف بين احتمال وقوع هذا الحدث واحتمال عدم حدوثه، فأي معنى للتفكير، فيما تساءل أينشتين، في وضع يمثل قنبلة تنفجر ولا تنفجر؟

في مراجعة نشرت لاحقًا عام 1935، استعار شرودنجر فكرة أينشتين، غير أنه أحدث فيها تعديلاً سيئ السمعة. لقد أصبحت قنبلة أينشتين قطة شرودنجر. يجلس هذا المخلوق المسكين عاجزًا بلا حول في صندوق مغلق، صحبة عينة إشعاعية صغيرة وعداد جيجر [Geiger counter، أداة لحساب المواد المؤينة] مرتبط كهربيًا بمطرقة تهشم قنينة سم حال سقوطها عليها. خلال ساعة، فيما اشترط شرودنجر، هناك احتمال قدره 50 بالمائة في أن تستثير العينة الإشعاعية عداد جيجر وتقتل القطة. يتعين وصف الذرات الإشعاعية نفسها، في تلك اللحظة، بطريقة كم – ميكانيكية على أنها على حد السواء من حيث البقاء على حالها ومن حيث الانحلال، لأنها تؤلف بين الاحتمالين. غير أنه يتعين، فيما أكد شرودنجر، وصف القطة المرتبطة بالذرة بالطريقة نفسها، بلغة كمومية، على أنها على حد السواء قطة ميتة وقطة حية. وهذا هراء؛ أليس كذلك؟

على نحو أكثر بيانًا من حجة أ ب ر، إما أن أحجية شرودنجر لغز عميق أو خطأ أحمق في التوجه، وفقًا على رؤية المرء في ميكانيكا الكم. لقد كان معروفًا آنذاك أن موجة شرودنجر الخاصة بإلكترون موجود في ذرة تتضمن احتمال أن يكون الإلكترون في موضع أو آخر حول النواة ـ لو قرر المرء إجراء تجربة للبحث عنه. غير أن هذا يختلف، فيما يصر الموالون لطريقة تفكر كوبنهاجن، عن قول إن الإلكترون بمعنى حرفي موجود قليلاً هنا وموجود قليلاً هناك في الوقت نفسه. وعلى نحو مماثل، فيما سوف يقولون، فإن حديث شرودنجر عن قطة نصف ميتة، نصف حية، إنما يشكل سوء استخدام للغة. الوصف الكمومي تصور فيما سوف تراه حين تفتح الصندوق وتنظر إلى القطة ـ سوف تكون ميتة أو حية، باحتمال 50 بالمائة لكل من هذين الإمكانين. هذا لا يعني أنه هناك حقيقة شيء من قبيل القطة نصف الميتة، نصف الحية.

تكمن المشكلة، كالعادة، في الترجمة من الوصف الكمومي للإمكانات إلى التصور الكلاسيكي للنتائج. منذ محاضرته في لقاء كومو، وافق بور على أن لدى الملاحظ قدرًا بعينه من الحرية في اختيار الطريقة التي يترجم بها، غير أنه أكد أن الخبرة وأحكام البداهة تؤمنان مرشدًا عمليًا. هذا يعني، في هذه الحالة، أنه ليس محظورًا قانونًا وصف قطة بأسرها بلغة كمومية، غير أنه لا ريب في أن هذا الوصف لا يقدم نفعًا كبيرًا ولا يحوز معنى منطقيًا. لماذا يرغب أي شخص في القيام بذلك؟ إن مؤدى حجة بور هو أن العلماء يعرفون من الخبرة أن الإلكترونات المقاسة موجودة في موضع أو آخر، وأن القطط الملاحظة ميتة أو حية. أين المشكلة إذن؟ ما جدوى استخدام لغة متعارضة في وصف وضع مستحيل فيزيائيًا لقطة لم ينظر إليها بعد؟

وبطبيعة الحال، عند أينشتين وشرودنجر، بور هو الذي أخطأ المراد. التقى شرودنجر مع بور فترة قصير في لندن في ربيع 1936، وأبلغ بور أينشتين، بأسلوبه الحذر والأخاذ، أنه اعتبر قيام نقاد بعينهم ببذل الجهد في معارضة ميكانيكا الكم أمرًا "مروعًا" و"خيانة عظمى". كانت اعتراضاته محددة: إن أينشتين وشرودنجر، فيما قال بور، كانا يحاولان فرض إرادتهما على ميكانيكا الكم، بدلاً من الاستماع إلى ما كانت ميكانيكا الكم تقول. وكما عبر بور عن ذلك بقوة في مناسبة أخرى، "من الخطأ أن نعتبر أن مهمة الفيزياء البحث في الكيفية التي تكون عليها الطبيعة. إن علم الفيزياء متعلق بما نستطيع قوله عن الطبيعة". هذا لا يبعد كثير عن الجملة الختامية في عمل فتجنشتين Ttactatus Logico–Philosophicus [الأطروحة المنطقية–الفلسفية] ـ "حين نعجز عن الكلام، يتعين علينا أن نصمت" ـ رغم أنه لا دليل على أن بور قد اطلع على كتاب فتجنشتين الموجز والحافل بالعبارات المأثورة.

وحتى نكون منصفين، فإن صرخات قطة شرودنجر الحزينة لفتت انتباه علماء الفيزياء إلى مسألة حاسمة. كيف يتسنى لوضع كمومي غير يقيني طرح إجابة محددة عن سؤال كلاسيكي؟ من ضمن ردود الأفعال المطروحة للأحجية إقرار مفاده أن التدخل البشري ضروري: لا يلزم القطة أن تكون حية أو ميتة بشكل قاطع إلا حين ينظر ملاحظ إليها. لقد ظل هذا التأويل الشائع بشكل غريب للحوادث الكمومية

عاجزًا دائمًا عن إقناع أي أحد. لقد كانت الإلكترونات القافزة ضمن الذرات وانحلال النواة الإشعاعية عمليتين واضحتين، تحكمهما الريبة الكمومية، مستمرتين بصرف النظر عن اهتمام أي ملاحظ أو عوزه.

وفق بور، كما هو الحال دائمًا، لا جدوى من الانشغال بمثل هذه المسائل. عبر خبرتهم الطويلة، يعرف علماء الفيزياء بشكل جيد تمامًا متى يحدث القياس. عمليًا، تبقى القطة خارج الصورة. عند معظم الفيزيائيين، الذين لا يفضلون التنقيب في الأعماق، هذا جيد بما يكفي. لقد أخبر هايزنبرج بور في بداية الثلاثينيات أنه توقف عن إشغال نفسه "بالقضايا الأساسية، فهي صعبة تمامًا عليَّ". وفي سلسلة محاضرات ألقاها عام 1955 في جامعة سينت أندروز في اسكتلندا، وافق هايزنبرج إلى حد كبير على وصايا بور، وقال حازمًا "إننا لا نستطيع ولا يتوجب علينا الاستعاضة عن هذه المفاهيم بأية مفاهيم أخرى".

شكل موقف هايزنبرج لعدة سنين المعيار المتفق عليه بين علماء الفيزياء. لقد اعتبر الانشغال بالأسئلة الميتافيزيقية والتأويلية التي تثيرها ميكانيكا الكم مهمة سيئة السمعة قليلة الشأن. غير أن عالم الفيزياء جون بل [John Bell] استنبط عام 1964 بطريقة بسيطة بشكل بارع من حجة أ ب ر تجربة معقولة، وإن كانت صعبة. لقد بين أن إجراء اختبارات متكررة على أزواج مرتبة بشكل مناسب من الجسيمات سوف يؤدي إلى فروق يمكن قياسها بين ما تقضي به ميكانيكا الكم وما يلزم حال اعتبار تعريف أ ب ر "لعناصر الواقع الفيزيائي" صحيحًا. بعد ما يقرب من عقدين، حين تم إجراء هذه الاختبارات الصعبة فنيًا، استبين أن ميكانيكا الكم صحيحة كلية. لقد كانت مشاعر أينشتين الداخلية حول شكل الواقع الفيزيائي تقوده إلى الطريق الخطأ.

غير أن هذا لا يحسم الجدل حقيقة. لقد كان مؤدى حجة بور في النهاية هو أن الحديث عن قطة كمومية، حيوان غريب نصف ميت نصف حي، مناف للعقل. غير أن شرودنجر، بموافقة أينشتين، أصر على أنه لا شيء في نظرية الكم الرسمية يحول دون التفكر في قطط كمومية، إذا رغبنا في ذلك، وما لم نفهم ما يحدث هنا، لن

نستطيع زعم فهم الطريقة التي تعمل بها ميكانيكا الكم. ليس بالمقدور استبعاد مثل هذه الصعوبات، التي بدا أن بور راغبًا في استبعادها.

سلط هذا التقدم النظري والتجريبي المتأخر الضوء على هذه الأحجية. القطة، خلافًا للإلكترون، ليست جسيمًا أوليًا. العدد الهائل من الذرات والإلكترونات التي توجد في القطة لا تسكن هادئة في وضع كمومي مفرد. إنها تقفز وتتفاعل، وهذا أمر كان يعرفه جيدًا أشياع النظرية الحركية في الغازات في القرن التاسع عشر. من منظور نظري، الحديث عن وضع القطة الكمومي يعني تحديدًا دقيقًا لما تقوم به كل ذرة مفردة وكل إلكترون في لحظة دقيقة بعينها ـ غير أن هذا الوضع يتغير بسرعة لا يمكن تخيلها من لحظة إلى أخرى. لذا فإن وضع القطة الكمومي شيء متقلب ومراوغ.

في الوقت نفسه، على الجانب التجريبي، استحدث الفيزيائيون المعمليون أساليب بمقدورها الحفاظ على مجموعة من الذرات في وضع كمومي حقيقي، ثابت لا يتغير، شريطة أن يكون عدد الذرات قليلاً وتكون الفترة الزمنية قصيرة. إن هذه الأوضاع، طالما أمكن الحفاظ عليها، تعرض سلوكًا كموميًا حقيقيًا.

الخلاصة هي أن حديث شرودنجر عن وضع القطة الكمومي، وفق رأي المفكرين الحديثين، غاية في السطحية. لو كان بالإمكان الحفاظ على كل ذرات قطة بأسرها في وضع كمومي مفرد ومثبت، لكان بالإمكان الحديث عن قطط كمومية نصف ميتة نصف حية. ولكن في الواقع، التفاعل المستمر والمركب على نحو لا سبيل لسبر غوره الذي يحدث في ذرات القطة يكفي لتأكيد استحالة وجود مثل هذا الوضع الكمومي، إلا في لحظة عابرة لا يمسك بها. عوضًا عن ذلك، فإن ما نلحظه في القطة ليس سوى تلك الخصائص التي تبقى ثابتة أثناء قفز الوضع الكمومي الداخلي شطر هذا الاتجاه أو ذاك. وهذه الخصائص المثبتة، فيما تقر الحجة، هي على وجه الضبط ما نعتبره صفات القطة "الكلاسيكية" ـ كونها ميتة أو حية مثلاً.

ولكن إذا كان شرودنجر مخطئًا في الاعتقاد في وجود معنى للحديث عن وضع القطة الكمومي، فإن بور مخطئ هو الآخر في اعتقاد أنه بمقدور المرء التحدث على هذا النحو، لكنه من المنافي للعقل قيامه بذلك. الراهن أن وضع القطة الكمومي مفهوم أكثر خفاء مما فهم كلاهما. على ذلك، لعل بور أقرب إلى الحقيقة في شعوره الغريزي بأن القطط الواقعية لا تسلك على نحو كمومي، رغم أنه - كالعادة - لا حجة مقنعة لديه تبرر هذا الحكم.

وعلى أي حال، لم يختف الاحتمال. يظل لدى قطة شرودنجر احتمال خمسين– إلى – خمسين في أن يكتشف أنها حية حين يفتح الصندوق. غير أنه لا سبيل لقول المزيد. هذا في النهاية ما جعل أينشتين منزعجًا إلى هذا الحد - فكرة أن النتائج الفيزيائية غير قابلة حقيقة للتنبؤ. ليس في وسع علماء الفيزياء اليوم الذين يشاركون أينشتين في انزعاجه زعزعة الشعور بوجود شيء مفقود. وكما قال أينشتين، وبودلسكي، وروزن، يتوجب أن تكون ميكانيكا الكم غير مكتملة. من جانب آخر، لم تكتشف أية تجربة خللاً في ميكانيكا الكم، وليس هناك منظّر طلع علينا بنظرية أفضل.

الفصل السابع عشر

منطقة حرام، بين المنطق والفيزياء

الفلسفة، فيما لاحظ بول ديراك ذات مرة، "مجرد طريقة في الحديث عن اكتشافات تم إنجازها بالفعل". إن هذا القول يفسر عدائية معظم علماء الفيزياء، الذين لا يروق لهم قيام الفلاسفة بإخبارهم ما تعنيه النظريات، ناهيك عن أولئك الذين يجرأون على إخبارهم عن الكيفية التي يتوجب وفقها ممارسة نشاطهم. على ذلك لاحظ هايزنبرج في نهاية حياته أن بور كان في أعماقه فيلسوفًا أكثر منه فيزيائيًا. تصعب معرفة ما إذا كان قصد من هذا نقده أو أنها مجرد ملاحظة. هايزنبرج نفسه، بعد تغلبه على ولعه بالتجوال الوجودي مع جماعة Pfadfinder، لم يبد انشغالاً كبيرًا بمحاولات تشكيل فلسفة يفيد منها العالم الكمومي.

غير أن بور لم يكن مثل سائر الفيزيائيين. لأنه لم يكن رياضيًا، مضى قدمًا مع شبكات من المفاهيم والمبادئ والألغاز بدت، لعالم الفيزياء النمطي، شبيهة بالفلسفة. في محاضرة نوبل، أثنى هايزنبرج على مشرفه بقوله صراحة إن ميكانيكا الكم نجمت عن "مشروع توسيع مبدأ بور في التطابق إلى مخطط رياضي كامل عبر تشذيب أحكامه". عند هايزنبرج، التطابق ـ القول بوجوب استيعاب نظرية الكم بطريقة سلسلة في الفيزياء الكلاسيكية ـ حكم فلسفي بشكل عام في حاجة إلى أن يعبر عنه في شكل كمي، رياضي، بحيث يفضي إلى نظرية حقيقية. وعلى نحو مشابه، نسبة إلى هايزنبرج، مبدأ بور العظيم الآخر في التتام ـ فكرة أن السلوك الموجي والسلوك الجسيمي متناقضان لكنهما ضروريان بالقدر نفسه ـ مفهوم فلسفي إلى حد كبير يسلط الضوء أحيانًا على مشاكل فيزيائية. غير أن المبدأ عند بور يأتي، على نحو مميز،

في المقام الأول. لقد أصبح التتام تحديدًا الفكرة الثابتة، وقد شرع بور يراه في كل مكان، في أشكال متعاظمة.

وحيدًا تقريبًا من بين رواد ميكانيكا الكم، كان بور مستعدًا بل تواقًا للكتابة والحديث عن المعنى الأوسع للاحتمال والريبة، والتأمل في كيف يمكن أن يؤثر هذان التغيران في طريقة تفكر علماء الفيزياء في العلوم الأخرى أيضًا. (حين كتب وتحدث أينشتين في هذه المواضيع الواسعة، كان يأمل بطبيعة الحال في كبح جماح تأثيرها المؤذي، لا توسيع نطاقه).

في عام 1932، تحدث بور عن "الضوء والحياة" في مؤتمر كوبنهاجن الذي عقد حول موضوع العلاج بالضوء في مختلف المشاكل الطبية. بعد بضع سنوات، ناقش "علم الأحياء والفيزياء الذرية" في لقاء عقد إحياء لذكرى لويجي جالفاني [Luigi Galvani]، العالم الإيطالي الذي قام في نهاية القرن الثامن عشر بإرعاش عضلات الضفادع باستخدام طاقة كهربية ضعيفة. غير أنه في عام 1938 كان يتحدث لعلماء الأنثروبولوجيا [علم الإنسان] والإثنولوجيا [علم الأعراق البشرية] عن "الفلسفة الطبيعية والثقافات البشرية". وكالعادة، كان يبدأ بالاعتذار بقوله إنه مجرد فيزيائي، يتحدث فيما يفترض عن مسائل تتجاوز اختصاصه المهني. غير أنه يواصل تجاوزه على أي حال.

قدم فكرته الكبرى، التتام، بأن شرح بإيجاز كيفية حل النزاع بين تصورات الضوء الموجية والجسيمية. أنذاك كانت الفيزياء تدرّس أن الأنواع المختلفة من الملاحظات تفضي إلى تصورات علمية مختلفة بل متناقضة، وهو يدافع عن هذا المبدأ بوصفه درسًا يتعين على جميع الفيزيائيين اعتباره. حين يتحدث عن الحياة مثلا، يقول إننا نستطيع أن نعتبر الكائن الحي مجموعة من الجزيئات مرتبطة بشكل معقد، تقوم بمهامها الميكانيكية وفق قوانين الفيزياء الأساسية، أو نعتبر الكائن الحي كلاً وظيفيًا، يتصف بخصائص نسميها الإرادة والغاية. هاتان رؤيتان متتامتان، فيما كان يقول، ليس لمجرد أنهما يؤمّنان منظورين مختلفين، ولكن لأنه يستحيل تبنيهما في الوقت نفسه.

إذا أردنا فهم الحياة على أنها آلية معقدة، تعين علينا أن نفكك أجزاء الكائن الحي جزيئًا جزيئًا لمعرفة كيف يعمل، غير أننا بالقيام بذلك، سوف نغفل عن خصائص في الحياة مأتاها الكائن الحي ككل. في المقابل، إذا أردنا دراسته عضويا، لن يسعنا أن نأمل في تمشيط دور كل جزيء مفرد.

من هذه الملاحظة يقفز بور إلى حكم درامي: "لمفهوم الغاية، الغريب عن التحليل الميكانيكي، تطبيقات بعينها في علم الأحياء". لقد كان يقول إن التتام يعني أنه بمقدور الغاية أن توجد بوصفها خاصية لكائنات حية بأسرها، حتى إن لم يكن لها معنى وفق العمليات الجزيئية المؤسسة والكيمياء الحيوية. وبالطبع، فإن هذا يتجنب كل أسئلة عن مصدر الغاية من وجهة نظر علمية، وهذا النوع من المراوغة هو الذي يجده أينشتين مثيرا للسخط حين يمارسه بور على طبيعة الواقع الفيزيائي.

في علم النفس، وجد عونا من التتام فيما يتعلق بحقيقة أن الإنسان مخلوق ذو عقل وعاطفة. نستطيع أن نحلل باستخدام المنطق وبطريقة لا تنحاز للأهواء؛ كما نستطيع في الوقت نفسه تفضيل خيارات بعينها وفق مشاعر وعواطف لا سبيل لتفسيرها عقلانيا. الدماغ نفسه يقوم بالاثنين. ورغم أن بور لم يكن لديه آنذاك نموذج لوظيفة الدماغ يستطيع ربطه بقدراتنا الاستدلالية والعاطفية، فلا ريب في أنه اعتقد أن التتام يمكن المنطق واللا – منطق من أن ينتجا عن المصدر نفسه.

لا يتضح إطلاقًا ما إذا كان بور قصد هذه الحجج حرفيًا أو مجازيًا، وحين يضطر إلى التحديد، فمن المرجح أن يرد مبتسمًا بأن المعنى والمجاز جانبان متتامان يتعين الحفاظ عليهما في الذهن في كل الأوقات. حسب رواية روزنفيلد، قال بور مرة "أنى ما خلصت إلى حكم محدد عن أي شيء، فإنك تخون التتام". من المغرى، لكنه، واحسرتاه، من غير المعقول، أن نعتقد أن بور كان يطلق نكتة ساخرة ولو على حساب نفسه.

حين يتمادى بور في غموضه أثناء حديثه عن مواضيع يتعاظم قدر اتساعها، يكاد تصميمه على ألا يقول شيئًا بشكل مباشر أو موجز يكون نوعًا من الفوبيا [الخوف المرضي]، تعلقًا نفسيًا غير سوي. علماء الفيزياء الآخرون يكتفون غالبا بهز رؤوسهم في حيرة محزنة. مثل أي عالم عظيم، اكتسب بور الحق في أن يدلل نفسه. وكذا فعل أينشتين، وإن حاول على أقل تقدير أن يتشبث غالبًا بأسئلة محددة في علم الفيزياء، وأن يجعل اعتراضاته واضحة، وإن أصبح عدد من يحمله محمل الجد قليلاً. لقد كان بور عالمًا قائمًا بذاته. ورغم أنه لا مراء في أن جمهور بور من علماء الأحياء، وعلم النفس، وعلماء الأنثروبولوجيا، ومن في حكمهم شعروا بالتكريم بسبب حضور عالم الفيزياء الغامر وبالتفضيل بسبب ملاحظاته العميقة، ليست هناك شواهد قوية على أن رؤى بور قد أثرت خارج الوسط الفيزيائي.

في الوقت نفسه، وسواء أكان الفيزيائيون يفضلون ذلك أم لا يفضلونه، لا يكاد الفلاسفة المحترفون يفشلون في ملاحظة الأفكار الغريبة التي حقنها رواد نظرية الكم في الفيزياء. لقد أتت الريبة في زمن به قدر لا يستهان به من الريبة بين الفلاسفة، الذين انقسموا إلى معسكرات تسود فيها آراء متباعدة بخصوص جدوى دراساتهم. موقفهم من ميكانيكا الكم بوجه عام ومن مبدأ هايزنبرج بوجه خاص اختلف بدوره وفق مسارات أيديولوجية.

ورغم أن المفكرين الوضعيين كانوا في الجانب الخاسر من المعركة حول واقعية الذرات، فقد تسنى لهم الصمود بل أصبحوا أكثر طموحًا في مدرسة فكرية عرفت باسم الوضعية المنطقية، جعلت من حلقة فينا [Vienna Circle] في عشرينيات القرن الفائت موطنا لها. اقترح أشياع الوضعية المنطقية تشكيل نوع من الحساب الفلسفي للعلم نفسه. بالبدء من الحقائق والمعطيات الإمبيريقية، يبين نسقهم كيف يتم استحداث نظريات صحيحة بشكل محكم وقادرة على تحمل أكثر أنواع التحليل الفلسفي صرامة. إذا أمكن جعل العلم آمنًا من وجهة منطقية، لن تساور مصداقيته الشكوك.

ذهب أرنست ماخ [Ernst Mach] وسائر الوضعيين الأقدمين إلى أن النظريات مجرد أنساق من العلاقات الكمية القائمة بين ظواهر يمكن قياسها؛ لكنهم أحجموا عن تبيان السبيل إلى نوع من الحقيقة الداخلية بخصوص الطبيعة. أخذ الوضعيون المنطقيون بوجه عام بهذه الفكرة، لكنهم جادلوا عن إنه إذا لم يكن بمقدور العلم التطلع إلى المعنى العميق، ففي وسعه أن يأمل على أقل تقدير في الحصول على الجدارة بالثقة. هذا يعني أنه يتعين أن تكتب لغة العلم بمنطق بحت قابل للتحقق. تحشد أعمال الوضعيين في هذه الفترة بشكل لافت بمعادلات المنطق الرمزي الصورية والاحتمال الرياضي، في محاولة لإقناع القارئ بوجود حساب لاستنتاج أن النظرية س أكثر جدارة بالثقة بنسبة قدرها بـ من النظرية ص من حيث قدرتها على تفسير المعطيات المتوفرة، وأنه إذا حدث أن حصلنا على معطى جديد م، أمكن قلب عجلة الآلة واختبار ما إذا كان م يدل على س أكثر مما يدل على ص.

وبطبيعة الحال، لا شيء من هذا يتعلق بما يقوم به العلماء فعلا، غير أن هذا ليس بالأمر المهم. سوف يستمر العلماء في استحداث نظريات وتجارب بطريقتهم المصادفية، والبدهية، والتوجيهية، وسوف يتصرف الفلاسفة كأنهم حكام. غير أنه استبين أن كتاب قواعد الحكام ليس بالعصمة التي افترضها مؤلفوه. لقد اكتشف كارل همبل، وهو أحد أعضاء حلقة فينا، صعوبة خادعة. هب نظريتك تقر أن كل الغدفان [نوع من الغربان] سوداء، يقول همبل. عثورك على غداف من أي لون آخر سوف يثبت بطلان هذه النظرية، وهذا ما يلزم أن يكون، كما أن عثورك على غداف أسود حقيقة سوف يؤمن درجة من الدعم لها. غير أن هناك مشكلة منطقية تنشأ هنا. الجملة أن كل الغدفان سوداء تستلزم أن كل ما ليس بأسود ليس غدافًا. ولذا، فيما جادل همبل، فإن أي شيء ليس بأسود وليس غدافًا - فيل أبيض، قمر أزرق، سمكة حمراء - يشكل قدرًا ضئيلاً من الدعم لنظرية الغدفان. قد يكون هذا محتمًا منطقيًا، غير أنه يبدو بعيدًا بشكل مناف للعقل عن أي شيء يشبه العلم.

ولا تقل عن هذا خطورة حقيقة أن مشروع الوضعية المنطقية يعد بمعنى ما تمرينًا في فكر الحتمية في القرن التاسع عشر، واصل تقدمه في الوقت الذي كان علماء الفيزياء

يستغنون عن الحتمية في مجالهم. لقد جاء مبدأ الريبة حين كان الهدف الفلسفي الخاص بتشكيل منهج علمي على الطريقة التقليدية في أسوء حالاته.

بعض الفلاسفة، ممن اعتقدوا فعلاً أن البحث عن تصور موضوعي في الطبيعة مجرد وهم، اعتبروا مبدأ هايزنبرج دليلا على أن العلم نفسه يؤكد الآن شكوكهم. لذا لا جدوى من الجدل حول ما تعنيه النظريات العلمية وفق علاقتها بعالم مفترض من الحقائق. الأمر الأكثر إثارة هو التفكر في كيف يتسنى للعلماء الاتفاق حول نظرياتهم، وفي السبيل إلى تحديد المعتقدات والتشيعات التي تقودهم، ومعرفة الكيفية التي تقوم وفقها الجماعة العلمية خفية بفرض الحكمة السائدة، وما شابه ذلك. لقد تطورت مثل هذه الدراسات بعيدا عن الفلسفة وأصبحت تعرف باسم سوسيولوجيا العلم. من بين الأمثلة على هذا المذهب إقرار بول فورمان أن الريبة نتجت استجابة لأوضاع ألمانيا فايمر ولا تكاد ترتبط بأي من مشاكل الفيزياء الباعثة على الضجر.

من جانب آخر، استمر الاعتقاد بين الفلاسفة الأكثر تقليدية في أن التصور العقلاني في العالم الفيزيائي ليس هدفًا منافيًا تمامًا للعقل. وفق رؤيتهم، جاء مبدأ الريبة بوصفه خبرًا غير سار حقيقة. في كتابه الصادر عام 1934 The Logic of Scientific Discovery [منطق الكشف العلمي]، قضى كارل بوبر [Karl Popper] على طموح الوضعية المنطقية في أن يكون بالمقدور إثبات صدق النظريات، وطرح مفهوما أصبح شائعا الآن مؤداه أنه لا يتسنى سوى إثبات بطلان النظريات. لقد جادل عن أن النظريات تصبح أكثر مدعاة لأن تصدق بقدر ما تجتاز من اختبارات، ولكن بصرف النظر عن جودة أدائها، تظل دائمًا عرضة للدحض من قبل تجربة جديدة. يستحيل على النظريات أن تحصل على أي ضمان بصحتها. صحيح أن العلم يشكل صورة عن الطبيعة يتنامى قدر كمالها، ولكن حتى قوانين العلم الأكثر حظوة بالتبجيل تظل عرضة للإبطال، إذا كان هذا ما تلزم به الشواهد.

ولأن بوبر أكد كثيرًا اختبار النظريات، تعين عليه أن يقر بأن التجارب تنتج دومًا أجوبة متسقة وموضوعية وجديرة بالثقة. قد لا يعول على النظرية بطريقة محتمة ما،

غير أنه يتعين أن يكون العلم الإمبيريقي جديرا بالثقة على نحو مطلق. هكذا واجه صعوبة مع مبدأ هايزنبرج، الذي يقول إنه لا ضرورة في أن ينتج مجمل الاختبارات الممكنة لنسق كمومي ما فئة من النتائج المتسقة. كي ينجح تحليله الفلسفي، اعتقد بوبر أنه يحتاج إلى مفهوم تقليدي في السببية ـ أي حدث بعينه ينتج، بطريقة يمكن التنبؤ بها كلية، نتيجة بعينها. لقد كان رد فعل بوبر لميكانيكا الكم بسيطًا: يتوجب أن يكون هايزنبرج مخطئًا.

وعلى أقل تقدير فإن هذا ما قاله في الطبعة الألمانية من كتابه The Logic of Scientific Discovery. لقد اعتذر قليلاً عن جرأته في استخدام المناهج الفلسفية في التعامل مع مسألة في الفيزياء، لكنه قال إنه بحسبان أن علماء الفيزياء أنفسهم اضطروا إلى اقتحام المناطق الفلسفية، لديه مبرر للاعتقاد أنه يمكن العثور على إجابة في "منطقة حرام، بين المنطق والفيزياء".

أصدر بوبر حكمًا مشكوكًا فيه مؤداه أنه يظل بالمقدور أن تكون ميكانيكا الكم صحيحة حتى إن كان بالإمكان القيام بتجربة تهزم مبدأ الريبة، وقد عرض مثالا على هذه التجربة أفكر فيه لنفسه. كان ذلك قبل نشر بحث أ ب ر. لم ينشر كتابه The Logic of Scientific Discovery بترجمة إنجليزية حتى عام 1959، وفي ذلك الوقت ضم في ملاحقه نسخة من رسالة من أينشتين، ومن ثمة سواه، يقول فيها إنه رغم أنه أمل هو الآخر في تجنب مضامين ميكانيكا الكم غير السارة، فإن التجربة التي اقترحها بوبر لا تنجز المهمة. رغم ذلك، أضاف بوبر ملاحق أخرى استمر يجادل فيها، لأسباب متنوعة، عن استحالة أن يشكل مبدأ هايزنبرج في الريبة القاعدة الحديدية التي حسب علماء الفيزياء أنه يشكلها.

من بين الفلاسفة المعاصرين القلائل الذين حملوا رؤى الفيزيائيين محمل الجد مورتز شلك [Moritz Schlick]، الذي حصل على درجة الدكتوراه على يد ماكس بلانك قبل أن يصبح أحد مؤسسي حلقة فينا. تراسل شلك بشكل جاد مع هايزنبرج كي يعرف ما يعنيه مبدأ الريبة حقيقة، وفي عام 1931 كتب بحثا مفيدا

بعنوان "Causality in Contemporary Physics" [السببية في الفيزياء المعاصرة]، جادل فيه عن أنه لم يتم فقد كل شيء. بتقصي مفهوم السببية الكلاسيكي، خلص إلى أنه ليس مبدأ منطقيًا دقيقًا بقدر ما هو موجّه أو معتقد استخدمه العلماء مرشدًا في تشكيل النظريات.

جادل شلك عن أن مغزى الريبة يكمن في أنه لا يزعج إلا بشكل جزئي قدرة العالم على التنبؤ. في ميكانيكا الكم، قد يفضي الحدث إلى تنويعة من النتائج المائزة، وفق احتمالات يمكن حسابها لكل ناتج. وحتى إن يكن، تظل الفيزياء تتألف من قواعد تخص سلسلة من الوقائع - شيء ما يحدث، يهيئ الظروف لشيء آخر، ثم، وقفا على الناتج، تقوم إمكانات أخرى بدور ما. هذا وصف مؤسس على ارتباطات سببية، فيما يرى شلك، باستثناء أن السببية أصبحت احتمالية. حقيقة أنه يمكن للأشياء أن تحدث بشكل تلقائي لا تعني أنه بمقدور أي شيء قديم أن يحدث، في أي وقت. في النهاية، تظل هناك قواعد.

يؤمن تصور شلك نوعًا من التسوية الفلسفية تتسق في روحها مع روح كوبنهاجن التي روج لها بور. مكمن قوة تحليل شلك في كونه يعرض أساسًا منطقيًا مرنًا للكيفية التي يمكن أن تستمر بها الفيزياء.

على ذلك، فإن المرونة لا تكفي عند معظم الفلاسفة. الذين يجازفون هذه الأيام بالكتابة في مسائل ميكانيكا الكم الفنية يبدون إلى حد كبير راغبين في الاستغناء عن تأويل كوبنهاجن الغامض بشكل مقصود. إنهم يظهرون افتتانهم اللافت بتأويل بديل لميكانيكا الكم أعده في خمسينيات القرن العشرين ديفيد بوم [David Bohm] يزعم استعادة الحتمية عبر ما يسمى بالمتغيرات الخفية. تحمل المتغيرات الخفية معلومات إضافية حول الجسيمات الكمومية، وفي الأمثلة التي تكون على شاكلة تجربة أ ب ر الذهنية، تحدد مسبقا ما سوف تكونه نتائج القياسات. المشكلة هي أن المتغيرات الخفية تظل كذلك، خفية. إن نسق بوم مصمم لإخفاء الحتمية بحيث يستحيل على أية تجربة أن تهزم مبدأ الريبة أو تعزز المعلومات الإضافية التي تمكن الملاحظ من معرفة

ما هو أكثر مما تسمح به ميكانيكا الكم القياسية. يذهب بعض الفلاسفة إلى اعتبار هذا مرضيًا تمامًا، رغم أنهم (كما في حالة بور والتتام) يجدون صعوبة في تفسير السبب. لم يعجب أينشتين وآخرون بالمعقولية البادية التي تسم إعادة بوم لصياغة ميكانيكا الكم. لقد كتب إلى ماكس بورن يقول "إن هذه الأسلوب يبدو لي رخيصًا جدًا".

عبر العقود، كتب الفلاسفة والمؤرخون وعلماء الاجتماع الكثير عن ميكانيكا الكم، خصوصًا فيما يتعلق بالريبة؛ غير أن معظم الجهود التي بذلوا لم تؤت أكلها. يفضل المؤرخون وعلماء الاجتماع إلى حد كبير الكتابة عن الأصول المؤامراتية لتأويل كوبنهاجن، عن الطريقة التي فرض بها بور وأتباعه فكرة غير مفهومة على جمهور علمي طيع. في الوقت نفسه، لم يتأس سوى قليل من الفلاسفة بسلوك شلك، أخذ تأويل كوبنهاجن على ظاهره بحيث يتم تقويم مناقبه ومثالبه. لقد بدا أنهم يجدونه منافيًا للعقل بشكل بدهي، فشرعوا مباشرة في البحث عن بدائل.

في الوقت نفسه، واصل الفيزيائيون سعداء بجهلهم استخدام وتطبيق ميكانيكا الكم بنجاح عظيم. صحيح أن بعضًا منهم آثر درب أينشتين وأصر على أنه يستحيل على نظرية في الطبيعية إحصائية في صميمها أن تكون الكلمة الأخيرة. غير أن مثل هؤلاء العلماء لم يكونوا بوجه عام يبحثون عن سبل جديدة في تأويل الصيغة القياسية من ميكانيكا الكم؛ بل أرادوا تغيير النظرية لمعالجة ما يعتبرونه إهمالاً وأخطاء تعاني منها. المواقف الفلسفية لا تقوم بدور كبير في الجهود التي يبذلون، باستثناء الفكرة الأولية أنه يتوجب على الفيزياء أن تسهم في الواقعية القديمة.

وكما حدث منذ عشرينيات القرن العشرين، لا تثار مسائل التأويل والفلسفة عند الغالبية العظمى الصامتة من علماء الفيزياء الذين يطبقون ميكانيكا الكم على مشاريعهم. في نهاية القرن التاسع عشر، خصوصًا عند العلماء الذين تعلموا في الموروث الألماني، كان هناك شعور بأنه يتعين على الفيزياء النظرية أثناء تطورها أن

تنتج فلسفتها الخاصة بها. أما الآن، فإن معظم علماء الفيزياء قد تربوا على الأسلوب الأنجلو – سكسوني، بعيدًا عن أفلاطون وكانت، وهم لا يبدون أي استعداد في الجدل حول رأي الفلاسفة في نظرياتهم.

الفصل الثامن عشر

فوضى في نهاية المطاف

إذا فشل مبدأ بور المقدس في التتام في هزيمة الفيزياء وأحدث بالكاد أثرا طفيفا خارج حدود العلم، فإن مبدأ هايزنبرج الدقيق على نحو مفارق في الريبة قد حظي بمستوى لافت من الاحتفاء الفكري. في الفوضى التي أعقبت الإطاحة بصدام حسين عام 2003، استحضر كاتب افتتاحيات حاذق مبدأ هايزنبرج ليشرح السبب الذي جعل الصحفيين يخطئون في فهم القصة الكبيرة. لقد قال إن الصحفيين الذين اندمجوا مع الجنود دونوا بشكل طبيعي كل المشاكل التي كانت تدور حولهم- دبابة أعطبت، نقص في الغذاء والوقود، خصومات مع المواطنين، سوء اتصالات بين أفراد الجيش- واستنبطوا من هذه الصعوبات المباشرة أن العملية بأسرها تنهار. غير أن هناك صيغة من مبدأ الريبة، فيما يقول ذلك المحرر، تملي أنه "كلما كانت وسائل الإعلام أكثر دقة في قياس الوقائع الفردية، بدت شؤون الحرب أكثر ضبابية عند الملاحظ". بتعبير آخر، كلما كنت أشد تركيزا على التفاصيل، قلت قدرتك على رؤية الصورة الكبيرة (يظهر هذا أقرب إلى التتام منه إلى الريبة نفسها، ولكن لنتجاوز عن ذلك).

ولكن، هل نحتاج حقيقة إلى هايزنبرج كي يعيننا على فهم أن التقارير الصحفية اليومية، خصوصا تلك التي ترسل من ساحة الحرب، تنزع إلى أن تكون تدريجية، غير تامة، ومتعارضة، وأن المحاور الأوسع قد تضيع وسط التفاصيل؟ هناك على أقل تقدير كليشيهان قديمان يبدو أنهما ينطبقان هنا على نحو لا يقل مناسبة: الصحافة هي المخطوط التقريبي الأول للتاريخ، يقول أحدهما، ويحدث أن من يرى الأشجار لا يرى الغابة، يقول الثاني. ليس ثمة ما يتعلق بميكانيكا الكم هنا.

أيضا فإن أشياع التفكيكية الأدبية يتعلقون كثيرا بمبدأ الريبة. إنهم يصرون على أن النص لا يحوز على معنى مطلق أو جوهري بل إنه لا يكتسب معناه إلا عبر فعل قراءته ـ ومن ثم فإن بمقدوره أن يكتسب معاني مختلفة وقفا على من يقوم بهذا الفعل. وتماما كما أن النتائج في ميكانيكا الكم تأتي عبر تفاعل بين الملاحظ [بكسر الحاء] والملاحظ [بفتحها]، فكذا حال معنى القطعة الأدبية التي تنشأ عن تفاعل القارئ مع النص (حيث يختفي المؤلفون من هذه المعادلة)، أو هكذا يريد منا التفكيكيون أن نعتقد.

في مقالة نشرت عام 1976 في The New York Review of Books يسخر جور فيدال [Gore Vidal] من منظري الأدب الذين يركنون إلى "الصيغ والأشكال؛ الناتج، لا ريب، عن التدريس في قاعات الدرس المعدة بالسبورات والطباشير. حسدا منهم لمبرهنات علماء الفيزياء نصف الممسحوة ـ العلامات الدالة على الأهمية ـ يقحم الآن مدرسو اللغة الإنجليزية أنفسهم في المنافسة معهم عبر تدوين مبرهنات ونظريات تخصصهم". إنه يتحدث بوجه خاص عن كيف أن نقاد تخصصات فكرية بعينها يفضلون اعتبار "مبدأ هايزنبرج الشهير والمشوش ثقافيا" تبريرا لمبادئهم. كما لو أن نقاد الأدب يحاولون متأخرين إنجاز صيغة مما فشل الوضعيون المنطقيون في القيام به منذ نصف قرن. لقد أراد الوضعيون جعل فلسفة العلم نفسها علمية. أما النقاد فقد أرادوا تغيير أمر الحكم على الروايات، الذي يفترض أن يكون مسألة جمالية، إلى تمرين تحليلي يتم بطريقة صورية.

تثير إشارة فيدال إلى مبدأ الريبة رد فعل من القارئ الذي يألف بالفيزياء، والذي يحتج بأن عبارة هايزنبرج مبرهنة علمية تتعلق بالقيام بأنواع بعينها من القياسات، وأن أي تطبيق له يتجاوز هذا النطاق عمل أبله. غير أن فيدال محق. سواء أعجب هذا الفيزيائيين أم لم يعجبهم، انتشر مبدأ هايزنبرج هنا وهناك وأحدث فوضى ثقافية. هذا لا يتعلق بما إذا كانت ريبة ميكانيكا الكم تحوز معاني أصيلة في مختلف مجالات الدراسة الفكرية القصية. إنه يتعلق بالطريقة التي أصبح بها هايزنبرج محكا، شارة للسلطة، في سياق مجموعة من الأفكار والتأملات.

يشكل المسلسل التفلزيوني The West Wing [الجناح الغربي] إعادة صياغة درامية لرجال المباحث الذي يتكلمون بسرعة، ويفكرون بسرعة، والذين يوجدون في أعلى مستويات المشهد السياسي في واشنطون. في أحد المشاهد، تلاحق هذه الشخصيات الخيالية من قبل طاقم تصوير أكثر خيالية (ما بعد–خيالي) يصور مواد شريط وثائقي حول الحياة في البيت الأبيض. لقد كان هذا على نحو مرض تمرينا ما بعد–حداثي: طاقم سينمائي حقيقي يرصد نشاط طاقم سينمائي خيالي يسجل أفعال شخصيات خيالية من أجل عمل ما يعد، في العالم الخيالي، فلما لا خياليا واقعيا.

في أثناء القصة، يقف صانع الفلم الذي لا يرى على الشاشة في انتظار سي.جي. كريج [C.j. Cregg]، المتحدث باسم البيت الأبيض، ليعرف ما إذا كان بمقدوره أن يتسقط الأخبار حول اجتماع على مستوى رفيع يضم الرئيس ومدير الف. ب. آي. [FBI]. يسأل صانع الفلم سي.جي. ما إذا كان هذا يوما عاديا حتى الآن.

"نعم ولا"، يرد سي.جي.
"أيرجع السبب إلى وجودنا هنا؟"
"لست في حاجة لأن أخبرك عن مبدأ هايزنبرج".
"أتقصد أن فعل ملاحظة الظاهرة يغيرها؟"
"نعم"، يقول سي.جي.، ثم يهرعون إلى الاجتماع.

أثناء الحلقة، تتهامس الشخصيات بشكل مستمر لبعضها البعض، تتسلل بعيدا عن الكاميرات، تتجمع في عجالة في أركان هادئة ـ كلهم يحاول تجنب التأثير المزعج الذي قد يحدثه المشاركون فيما يفترض أن يكون عملا وثائقيا. يصعب تسيير حدث سياسي مثير تحت أعين الناس. غير أن هذا يسهل فهمه. ضع مجموعة من الكاميرات في وسط ظرف متوتر وخصوصي، وسوف يشرع الناس في السلوك بطرق غريبة. هذا أمر يألفه كل من يلتقط صورا في حفل زفاف أو يسجل لقاء عائليا بالفيديو. فما مبرر إقحام هايزنبرج في هذا؟

العنصر المشترك في هذه الأمثلة هو فكرة عدم وجود حقيقة مطلقة، أن ما تراه يتغير حسب ما تبحث عنه، أن القصة تتوقف على من يستمع ويرقب قدر ما تتوقف على من يسلك ويمثل ويتكلم. هناك على أقل تقدير رابط مجازي مع ما قاله هايزنبرج عن القيام بقياسات. بهذا المعنى، إذا تعين علينا لوم أي شخص على لعنة النسبانية التي يفترض أن الفكر الحديث ابتلي بها (ليس هناك قصة يرويها أي أحد "أفضل" من غيرها، على حد تعبير علماء الاجتماع؛ كل وجهات النظر صحيحة على نحو متساو)، فلعله يتوجب علينا لوم هايزنبرج أكثر من لومنا أينشتين. صحيح أن النسبية ـ أي نظرية الزمان–المكان العلمية ـ تقر أن الملاحظين المختلفين يلحظون الوقائع بطرق مختلفة، غير أنها تؤمن أيضا إطارا يمكن عبره المصالحة بين وجهات النظر هذه في تصور متسق وموضوعي. النسبية لا تنكر وجود حقائق مطلقة؛ هذا ما يقوم به مبدأ الريبة.

ولكن حتى في الفيزياء، مبدأ الريبة ليس بأي حال وثيق الصلة بشكل دائم. إن مبلغ مفاد برنامج بور في التام هو إعانة علماء الفيزياء على التعامل مع الحقيقة البدهية أن العالم الواقعي، عالم الملاحظات والظواهر الذي نعيش فيه، يبدو صلبا تماما رغم حقيقة أن تحته تكمن لاتحددية ميكانيكا الكم الغريبة. إذا كان مبدأ هايزنبرج لا يدخل كل ذلك في الغالب في تفكير عالم الفيزياء العادي، فكيف يكون مهما في الصحافة، أو نظرية النقد الأدبي، أو كتابة المشاهد التلفزيونية؟

ن

عرف مسبقا أن الناس يسلكون بطريقة غريبة أمام الكاميرات، أنهم لا يخبرون قصصهم لصحفي الجرائد على النحو الذي يخبرونها أصدقاءهم. نعرف أن عالم الأنثروبولوجيا، حين يقوم بزيارة مفاجئة لدراسة ثقافة قرية نائية، يغدو مركز انتباه وأن هذا يصعّب عليه رؤية الناس يتصرفون على سجيتهم. نعرف أن قصيدة الشعر أو الرواية أو قطعة الموسيقى لا تعني الشيء نفسه لكل القراء والمستمعين.

إن استحضار اسم هايزنبرج لا يجعل هذه الأفكار السائدة أسهل على الفهم، لسبب بسيط، كونها سهلة أصلا على الفهم. بداهة، ما يثير النفس هو وجود ما يشبه

الرابط، العامل المشترك الخفي، بين المعرفة العلمية وسائر أنواع المعرفة. نعود، في هذا الطريق الدائري، إلى سخرية د.هـ. لورنس من النسبية ونظرية الكم ـ أنه معجب بهما لأنهما فيما يبدو يثلمان نصل الموضوعية العلمية والحقيقة. لا يلزمنا أن نكون محافظين فكريا مثل لورنس كي نرى الغواية هنا. لعل الطريقة العلمية في المعرفة، في عالم ما بعد–هايزنبرج، ليست مروعة على النحو الذي بدا مرة.

إن الحلم الكلاسيكي بمعرفة علمية كاملة، بحتمية متشددة وسببية مطلقة، هو الذي قرع نواقيس الخطر حين تم تعميمه خارج حدود العلم. مثال لابلاس في القابلية الكاملة للتنبؤ ـ أنك إذا عرفت الحاضر على وجه الضبط، سوف يكون في وسعك التنبؤ بالمستقبل كلية ـ جعل البشر فيما يبدو كائنات آلية لا حول لها ولا قوة. تفكر في ماركس [Marx] وإنجلز [Engels] والاشتراكية العلمية، الحكم بأن التاريخ البشري يتكشف وفق قوانين لا مناص منها. تفكر في حركة تحسين النسل وأحكامها المحسوبة عن كيف يمكن تطوير الكائنات البشرية بالقوة بدلا من الانتخاب الطبيعي. لعل ثورة مفكرين مختلفين اختلاف أزوالد اشبنجلر ود.هـ. لورنس ضد حلم التكنوقراط لم تكن دوما مبررة بشكل جيد، غير أنها تأتي من خشية شديدة، لا تعوزها الوجاهة، من سطوة العلم خارج حدوده.

ولكن، وكما رأينا، لم تكن الحتمية العلمية إطلاقا، حتى في أوجها، حركة ظافرة على النحو الذي بدا. لقد كان من شأن الاستدلال الإحصائي، الذي عرفته الفيزياء قبل ولادة هايزنبرج، أن يجعل القابلية التامة للتنبؤ غاية لا سبيل لاقتناصها. في تلك المرحلة بدأ ملاحظنا ثاقب الذهن هنري آدمز قلقا من أن قوى العلم الطالعة حديثا، التي اعتبرها مثيرة للإعجاب ومروعة، قد تتفتت حتى تتلاشى تماما. قرب نهاية كتابه The Education of Henry Adams [تعليم هنري آدمز] يقول المؤلف "لقد وجد نفسه في أرض بكر لم يطأها أحد من قبل، حيث النظام علاقة عارضة تنفر من الطبيعة؛ والقسر الاصطناعي يفرض على الحركة؛ وتثور ضده كل طاقة حرة في الكون؛ ولأنه عرضي، ينحل ثانية إلى فوضى في نهاية المطاف".

في خضم هذا النزاع الفكري، أمّن ظهور مبدأ الريبة في ميكانيكا الكم، بعد عقدين من إنهاء آدمز سرد ذكرياته، شيئا مما يعيد الثقة لكلا الطرفين. لقد وضع شاهد ضريح على الحتمية الكلاسيكية المتشددة. بيد أنه فشل في الوقت نفسه في تقويض العلم بأي معنى بعيد. لقد اقترح أن للعلم حدودا، رغم كل قوته العجيبة ونطاقه الواسع. في النهاية، لن تحل العقلانية الباردة محل كل صنوف المعرفة الأخرى.

هذا مكمن الفتنة المجازية في مبدأ هايزنبرج في الريبة. إنه لا يجعل الصحافة أو الأنثروبولوجيا أو النقد الأدبي تخصصات علمية، بل يخبرنا أن المعرفة العلمية، مثل فهمنا العادي للعالم اليومي الذي نعيش فيه، يمكن أن تكون عقلانية وعارضة، هادفة وطارئة. الحقيقة العلمية قوية، لكنها ليست مطلقة القوة.

خشية آدمز من الفوضى مبالغ فيها. براجماتيا، يواصل علماء الفيزياء ممارسة نشاطهم دون شعور مكثف بالانزعاج الميتافيزيقي من تلوث تخصصهم بالاحتمال والريبة. في معظم الأحيان ينأون عن الأسئلة العميقة حول معنى ميكانيكا الكم. وكما عبّر جون بل وزميله مايكل نيونبرج [Michael Nauenberg] بأسلوب جميل، "يشعر عالم الفيزياء النمطي أنه سبق أن أجيب منذ زمن بعيد [عن مثل هذه الأسئلة]، وأنه سوف يفهم ذلك تماما لو استطاع أن يوفر من وقته عشرين دقيقة للتفكر فيها".

غير أن بور أوصى بألا نسرف أصلا في التفكر فيها. لقد أكد أنه لا معنى للسؤال عن الطريقة التي يبدو بها العالم الكمومي، لأن مثل هذه المحاولة تعني بالضرورة وصف العالم الكمومي بلغة مألوفة، أي كلاسيكية، تقتصر على إعادة صياغة السؤال الأصلي. صحيح أن التعبير عن الحقائق الكمومية بلغة كلاسيكية مشروع تسوية، وفق بور، لكنه أفضل ما نستطيع.

لا يلزم المرء أن يكون أينشتين كي يجد هذا غير مرض، بل مناقضا لروح العلم الحقيقية. أين يقول العلم إن هناك أسئلة يتوجب ألا تثار، مواضيع ينبغي ألا تناقش؟

الحال أن تقدم العلم قد شهد خلال القرنين الماضيين توسعا هائلا في مجالات كنا حسبنا أنه غير مسموح بها لفلاسفة الطبيعة. قبل النصف الثاني من القرن التاسع عشر، كان السؤال عن أصل الشمس والأرض ضمن اختصاص علماء اللاهوت. بعد ذلك، تسنى للعلماء المسلحين بمعرفة جديدة عن الطاقة والميكانيكا الحرارية، ضم هذه المنطقة. في هذه الأيام، يكتب علماء الفيزياء أبحاثا مكثفة وصعبة حول أصل الكون نفسه. في التعامل مع هذا الحدث العظيم، يتعين على هؤلاء الفيزيائيين التعامل مع الجاذبية، وفيزياء الجسيمات، وميكانيكا الكم، كلها في الوقت نفسه ـ باستثناء أنه ليست لديهم حتى الآن نظرية موحدة يمكن توظيفها في التعامل مع هذه الصعوبات التي تواجههم. لقد ظلت الجاذبية، في شكل النسبية العامة، كلاسيكية أساسا من حيث الشكل، تفترض السلاسة، والاتصال، والسببية في المكان والزمان، حتى على المستوى متناهي الصغر. أما ميكانيكا الكم فتنتقل من التمايز والانفصال إلى الريبة، وفي الانفجار العظيم يحدث التصادم بين هذين النوعين من التفكير.

لم يعثر علماء الفيزياء بعد على نظرية كمومية في الجاذبية ترشد حراكهم في محاولة إعادة تشكيل الكيفية التي بدأ بها الكون. على ذلك، يبدو أنه لا مناص من أن ولادة الكون كانت حدثا كموميا، بحيث إن وجودنا نفسه يرتهن في النهاية بسؤال غريب عن الكيفية التي يتسنى وفقها للتحولات الكمومية المراوغة أن تنتج ظواهر صلبة ومحسوسة كهذه.

إذا كان مفاد موقف بور أنه يستحيل على مثل هذه الأسئلة أن تصاغ بشكل مرض، ناهيك عن أن يجاب عنها، فيبدو أنه يقول إن التساؤل حول ولادة الكون خارج نطاق العلم. غير أن هذا عند علماء فيزياء اليوم موقف غير مقبول.

تحشد الدوريات المتميزة في الفيزياء النظرية بمحاولات المزاوجة بين ميكانيكا الكم والجاذبية. لقد أنتجت هذه المقترحات نظريات مبهمة مؤسسة على جاذبية فائقة، أوتار عظيمة، أبعاد فوق زماكانية، وكثيرا غير هذا. في هذه الأيام يكثر الحديث عن نظرية–م [M–theory]، والبرانز [Branes]، وهي بنى رياضية مخيفة لا يفهمها

إلا نزر قليل، لا ضمان لوجودها، وعلى أي حال لم تثبت بعد قدرتها على أداء المهمة المرجوة منها.

ركزت معظم هذه الجهود على الجانب المجهري من المشكلة. لقد أراد علماء الفيزياء نظرية تصف التفاعل الجاذبي بين جسيمين أوليين بطريقة كموم–ميكانيكية. غير أن النظرية النسبية العامة ليست مجرد نظرية في الجاذبية. إنها فضلا عن ذلك نظرية في الزمان والمكان والسببية. إنها تشمل الاشتراط، وعند أينتشين المبدأ الأساسي، أنه يستحيل على التأثيرات الجاذبية، شأن سائر الآثار الفيزيائية، أن تنتقل من موضع إلى آخر بسرعة تفوق سرعة الضوء.

هذا ما جعل أينشتين يركز على نوع التجارب التي يقول بها أ ب ر بوصفها إشارة عميقة على استحالة أن تكون ميكانيكا الكم صحيحة ـ لأنه يبدو في مثل هذه الظروف أن هناك تأثيرا مراوغا وفوريا يربط بين السلوك الكمومي الذي يقوم به جسيمان بصرف النظر عن سرعة حركتهما بعيدا عن بعضهما. إن هذا الرابط البعيد والمزعج، مثل أي شيء غريب آخر في ميكانيكا الكم، إنما ينشأ بسبب ضرورة الريبة. لأن نتاج قياس جسيم مفرد غير قابل لأن يتنبأ به بشكل تام، حيث يبدو أن هناك ضرورة في ربط الجسيم الثاني بطريقة ما حتى تظل القياسات التي تجرى عليه متساوقة مع ملاحظات الجسيم الأول.

هكذا تقلق الريبة النظام القديم، ليس فحسب على أصغر المستويات، بالطريقة التي نعرف بها بخصوص الجسيمات الفردية الأولية، بل حتى على المستوى الكوني، وفق الطريقة التي يربط بها بين السببية والاحتمال عبر مسافات هائلة. يفترض أن تهب النظرية الكمومية الصحيحة في الجاذبية معنى منطقيا لكل هذه الصعوبات.

غير أنه لا يكاد يرجح في هذه المرحلة من اللعبة أن تذوي الريبة في النظرية الكمومية للجاذبية. كل الأدلة تشير إلى إنها موجود هناك كي تبقى إلى الأبد. لا

سبيل للنكوص إلى عهود الحتمية المطلقة الغابرة، حيث تفضي معرفة الحاضر، فيما أمل الماركيز دي لابلاس، إلى معرفة كاملة بالماضي والمستقبل.

من منظور كوني، قد يكون هذا حسن. في الكون اللابلاسي ليست هناك لحظة يولد فيها الكون، لأنه ينبغي على أية فئة من الظروف الفيزيائية أن تنشأ منطقيا وبشكل محتم عن ظرف أسبق، وهكذا إلى ما لا نهاية. لا شيء غير مسبب يمكن أن يحدث. غير أن الكون الكمومي مختلف. منذ أن تساءلت ماري كوري عن تلقائية الانحلال الإشعاعي، وتساءل رذرفورد بور عما يجعل الإلكترون يقفز من موضع في ذرة إلى آخر، تم التسليم بأن الحوادث الكمومية، في نهاية المطاف، تحدث دون سبب على الإطلاق.

هكذا نصل إلى طريق مسدود. ليس بمقدور الفيزياء الكلاسيكية أن تفسر حدوث الكون، لأنه لا شيء يحدث ما لم تكن هناك حوادث سابقة سببت حدوثه. وليس بمقدور ميكانيكا الكم أن تفسر حدوث الكون، لأن مبلغ ما تستطيع قوله هو أنه حدث، بشكل تلقائي، بوصفه مسألة احتمال لا مسألة تيقن. بتعبير آخر، فإن أينشتين كان محقا حين شكا من أن ميكانيكا الكم لا تستطيع سوى توفير صورة غير مكتملة للعالم الفيزيائي. ولكن لعل بور كان أقرب لأن يكون محقا حين ذهب إلى أنه لا يتعذر فحسب تجنب عدم الاكتمال بل هو ضروري. هكذا نخلص إلى مفارقة ما كان لها إلا تحظى بإعجاب بور: لم يأت كوننا إلى الوجود إلا عبر فعل ريبة كموم-ميكانيكي مبدئي لا سبيل لتفسيره، أطلق سلسلة من الحوادث أدت إلى ظهورنا في المشهد نتساءل عن ماهية القوة الدافعة التي أفضت إلى وجودنا.

حاشية

في عام 1954، زار هايزنبرج أينشتين في برنستون، قبل عام من وفاة الأخير، حيث أمضى معه ساعات قلائل. كان صحة الرجل العجوز قد وهنت، بعد أن بلغ من العمر خمسة وسبعين عاما، وكان أينشتين قد علم قبل بضع سنين أنه يعاني في أحشائه من حالة أنورسما [تمدد في الأوعية الدموية] تتفاقم بطيئة. في التدخل الجراحي مخاطرة، كما أن أينشتين لم يكن يرى جدوى من دفع المحتم. في الأثناء عانى من الأنيميا لكنه شفي منها. حين مر به هايزنبرج، تحدثا بأسلوب مهذب عن شؤون صغيرة. لم يتحدثا عن الحرب، ولم يتناقشا طويلا حول ميكانيكا الكم. لقد أخبر أينشتين زائره بأنه لا يحبذ "هذا النوع الذي تحبذ من الفيزياء". "ثمة اتساق، لكنه لا يروق لي".

أوهنت الحرب علاقة لم تكن قوية أصلا. وبالطبع، فإن أينشتين وقّع على الرسالة الشهيرة إلى الرئيس روزفلت التي ضمنها مخطط إمكان صناعة قنبلة ذرية، وإن لم يشارك في علمية التصميم أو الصنع. بالقدر الذي استطاع إليه سبيلا، بقي بور في كوبنهاجن المحتلة من قبل ألمانيا إلى أن هرّبته القوات الجوية الملكية [Royal Air Force] سرا، بشكل كاد يقضي عليه. ورغم أنه كتب عن فيزياء الانشطار النووي، لم يقم إلا بدور غير مباشرة في مشروع مانهاتن.

في الأثناء، بقي هايزنبرج في ألمانيا. زيارته الكارثية لبور عام 1941، التي أودت بما تبقى من صداقة بينهما، شكلت محور مسرحية مايكل فريان [Michael Fryan] الثاقبة والسوداوية Copenhagen [كوبنهاجن]. كان هناك مشروع ألماني لتوظيف الطاقة النووية، أسهم فيه هايزنبرج، ولعله استشار بور في بعض الجوانب الفيزيائية المتعلقة.

قالت زوجة بور إنه كان هناك دائما تحفظ عاطفي، مسافة فاصلة، في علاقات هايزنبرج. لقد مر زوجها، فيما أضافت، بلحظات حرجة مع هايزنبرج، "غير أنه كان بينهما رجلا لطيفا .. إنه من النوع الذي يوصف بأنه طيب الأصل، أعني أن سلوكه دمث وأنه حسن المعشر. غير أنه يظل يعاني من مشاكل مع هايزنبرج". كان دوما خجولا، متحفظا، رسميا و لم يكن إطلاقا حميميا مع الآخرين. ديراك، الذي لم يكن اجتماعيا هو نفسه، لم يجد صعوبة في الإنسجام مع بور، رغم أن بولي سريع الغضب والودود بشكل إيجابي لم يكن ليرتاح في حضرة هايزنبرج.

لم يتضح إطلاقا ما أنجزه المشروع النووي الألماني في زمن الحرب، ولا حتى ما حاول إنجازه. كانت موارد البلاد، الطبيعية وحتى الفكرية، قد نضبت، فيما لوحق الكثير من علماء الفيزياء الذين تنشأوا هناك. لم يكن هايزنبرج، الذي يعد بلا شك واحدا من أعظم مخترعي ومنظري الفيزياء النظرية، الرجل الذي يستطيع ممارسة الفيزياء النووية العملية أو الأعمال الهندسية. يبدو أنه لم يفهم إطلاقا الكيفية التي يمكن أن تعمل بها القنبلة وحسب أن الأمر يحتاج إلى طن من اليورانيوم. في فترة لاحقة تمت ترجمة هذا الفشل بطريقة فجة إلى قصة مفادها أن الألمان، هايزنبرج تحديدا، قد انصرفوا عن صنع أسلحة ذرية بسبب معارضتهم الأخلاقية لها، بل إنهم قاموا عمدا بتضليل رؤسائهم السياسيين بخصوص إمكان صنعها. غير أن هايزنبرج لم يقل إطلاقا أي شيء من هذا القبيل. تحديدا، فإنه لم يقم صراحة بالتبرؤ منها.

قام كثير من علماء الفيزياء بتجنب هايزنبرج بعد الحرب، وإن حاول بور على أقل تقدير أن يكون كيسا. على ذلك، أخذ هايزنبرج طريقه عائدا إلى الجماعة العلمية، حيث أصبح في النهاية مدير معهد ماكس بلانك في ميونخ. كان أينشتين قد رحل قبل ذلك بفترة طويلة. توفي بولي فجأة عام 1958، فيما مات بور عام 1962. أما هايزنبرج فقد وافته المنية في ميونخ عام 1976.

شكر وتقدير

أدين بالكثير بتفاصيل تجاوزت قدرتي لعدد من الكتاب الذين تقصوا عبر السنين تاريخ ميكانيكا الكم، عولت على أعمالهم بشكل كبير في كتابة تصوري. تحديدا أثمّن جهود كل من إبراهام بيز وديفيد كاسيدي [David Cassidy]. وبطبيعة الحال، لا أحد منهم ولا من غيرهم من الكتّاب يتحمل مسؤولية أية أخطاء أو أحكام غريبة في تصوري للتاريخ.

ما كان لي أن أتمكن من إعداد هذا الكتاب لولا إفادتي من خدمات مكتبة نيلز بور في مركز تاريخ الفيزياء [Center for History of Physics] في المعهد الأمريكي للفيزياء [American Institute of Physics] في جامعة بارك، ميرلاند؛ ولذا فإني أتقدم بجزيل الشكر للموظفين الذين كانوا مستعدين دوما لعوني. أنا ممتن أيضا للمساعدة المفيدة واليسر الذي حصلت به على مصادر من مكتبة الكونجرس، مكتبات جامعة ميرلاند، وجامعة جورج ميسون، ومكتبة دبنر السمسثونية لتاريخ العلم والتقنية في المتحف الوطني للتاريخ الأمريكي

[Smithsonian's Dibner Library of the History of Science and Technology in the National Museum of American History].

(أشكر أيضا ماري جو لازون [Mary Jo Lazun] التي مكنتني من هذا المتحف).

أجريت محادثة ممتعة ومفيدة حول بحث أ ب ر مع آبنر شيموني [Abner Shimony] من جامعة بوسطن، كما أعانني رالف كان [Ralph Cahn] ببعض التراجم عن الألمانية.

من منحى آخر، شجعتني (بل دفعتني) وكيلة أعمالي سوزان رابنر [Susan Rabiner]

على أن أكون أكثر وضوحا بخصوص القضايا التي يناقشها هذا الكتاب قبل الشروع في كتابته. وكالعادة، فإنه لولا عونها لما تسنى لهذا المشروع أن يبدأ أصلا. أما عين تشارلي كونراد [Charlie Conrad] من دبلدي [Doubleday] التحررية الثاقبة، فقد جعلت هذا الكتاب أرفع وأرشق وأكثر هدفية مما كان له أن يكون. جزيل شكري لكليهما.

وأخيرا، أشكر بيجي ديلون [Peggy Dillon]، على التشجيع المعنوي الذي قدمته لي، خصوصا في المراحل المبكرة المترددة التي تم فيها توليف أجزاء المشروع.

ملاحظات

لم أحاول في هذه الملاحظات أن أضع حاشية على كل قصاصة من المعلومات يتضمنها المتن. بوجه عام، مصدر التفاصيل الخاصة بحياة المشاركين وأعمالهم هو الأعمال الواردة في البيبلوجرافيا [ثبت المصادر]. تحديدا فإن Dictionary of Scientific Biography، [قاموس السير العلمية الذاتية]، الذي حرره سي.سي. جيلبسي [Gillispie]، هو المرجع المقصود في حالة الشخصيات الأقل أهمية، ما لم يشر إلى خلاف ذلك.

بخصوص فهمي لظهور نظرية الكم، عوّلت بشكل مكثف على ثلاثة الكتب التي ألفها إبراهام بيز والوارد ذكرها في البيبلوجرافيا. كانت سيرة حياة هايزنبرج التي كتبها كاسيدي [Cassidy]، وسيرة كرامرز التي كتبها درسدن [Dresden] مفيدتين، وكذا شأن المقدمة المطولة التي كتبها فان در فاردن [van der Waerden] استكمالا لأبحاثه المهمة. لم استخدم كتاب التاريخ متعدد الأجزاء الذي ألفه مهرا ورتشنبرج [Mehra and Rechenberg] بالقدر نفسه، فقط لأنه يأتي على تفاصيل تعدت ما احتجت لرواية القصة.

مقابلات أ ت ف ك [A H Q P]، هي التواريخ الشفاهية المسجلة التي لا تقدر قيمتها والتي يتضمنها "أرشيف تاريخ فيزياء الكم" [Archives of History of Quantum Physics]،

وهو مشروع مشترك بدأ عام 1960، قامت به الجمعية الفلسفية الأمريكية [American Philosophical Society] والجمعية الفيزيائية الأمريكية [American Physical Society] (ثمة المزيد من التفاصيل في: www.amphilsoc.org|guided|ahqp). لقد اطلعت على مخطوطات هذه المقابلات في مكتبة نيلز بور ومركز تاريخ الفيزياء في المعهد الأمريكي للفيزياء في جامعة بارك، ميرلاند. معظم مقابلات أ ت ف ك، حتى في حالة غير الناطقين بالإنجليزية، أجريت بهذه اللغة، وهذا مأتى غرابة بعض الصياغات.

أنى ما أمكن، حاولت العثور على المصادر الألمانية للملاحظات المقتبسة في النص، ولذا فإن ترجماتي تختلف أحيانا عن الصيغ المنشورة بالإنجليزية في مواضع أخرى.

1. الجسيمات سريعة التهيج

ص. 10 "فهرسا يسعى على قدمين": ملاحظة قالها إدوارد باري، مكتشف معماري مستقبلي، اقتبسه:

Patrick O'Brian in Joseph Banks: A Life (Chicago: University of Chicago Press، 1987) ، 300.

ص. 10: قبل زواجه، ... تشارلز داروِن:

N. Barow، ed. The Autobiography of Carles Darwin (London: Collins، 1958)، 103- 4.

ص. 10: في يونيو 1827، بدأ براون دراسة: هنا مزجت بين كلمات براون وملاحظات من بحثيه الشهيرين في

Philosophical Magazine 4 (1828): 161 amd 6 (1829): 161.

ص. 11: "حركة معظم هذه الدقائق الحية": مقتبسة من رسالة بعث بها ليوين هويك [Leeuwenhoek] إلى هنري أولدنبرج [Henry Oldenburg]، سكرتير الجمعية الملكية، في 7 سبتمبر 1674، في:

C. Dobell، ed.، Antony van Leeuwenhock and His "Little Animals" (New York: Dover، 1960)، 111.

ص. 15: كان مصدري لهذا المرجع هو:

"Brown's New thing": George Eliot، Middlemarch، ch. 17; Nelson 2001، 9.

ص. 17: يصعب بشكل غريب: انظر

J. Delsaulx، Monthly icroscopical Journal 18 (1877): 1; and J. Thiron، Revue des Questions Scientifiques 7 (1880): 43.

p. 18: "une trepidation constante et caracteristique"; L.-G. Gouy، Comptes endus 109 (1889): 102.

2. الأنتروبيا تسعى للقدر الأعظم

ص. 38: "هذه الظاهرة لم تكد تأسر إلا بالكاد":

L.-G Gouy، Comptes Rendus 109 (1889): 102.

ص. 39: يمكن العثور على عبارة لابلاس الشهيرة "لنا أن نعتبر الوضع الراهن"، المقتبسة من كتابه Theories Analytique des Probabilities في:

J.H. Weaver، ed.، The World of Physics (New York: Simons & Schuster، 1987)، vol. 1، 582.

ص. 40: إن "الحركات الملاحظة في كل جسيمات ... الصغيرة": Lindley، 212؛ الملاحظة مقتبسة من رد بولزمان على نقد زيرميلو.

ص. 42: "من الممكن أن تكون الحركات التي تتعين مناقشتها هنا":

A. Eistein، Annalen der Physik 17 (1905): 549.

ص. 44: "التركيب العلمي الذي يوصف عادة بـ "الوحدة": Adams، 431.

3. مسألة غامضة، موضع حيرة عظيمة

ص. 51: "لكن الراديوم كفر بإلهه": Adams، 381.

ص. 52: "النشاط الإشعاعي خاصية ذرية": Pais، 1986، 55؛ مقتبسا من بحث نشر عام 1898 من قبل آل كوري و ج. بمونت [G. Bemont].

ص. 52: "تلقائية الإشعاع مسألة غامضة": Quinn، 159، مقتبس من تقرير آل كوري إلى "المؤتمر الدولي"، باريس، 1900.

ص. 55: "لم يسبق أن كان لدي طالب أكثر حماسا": من مجموعة رذرفورد في مكتبة جامعة كيمبردج، MS.Add. 7653: PA.296.

ص. 55: ما اقترحه رذرفورد وسودي:

E. Rutherford and F. Soddy، Philosophical Magazine 4 (1902): 370 and 569.

ص. 56 قد يكون لدى الذرة مكونات داخلية:

A. Debieme. Annales des Physique 4 (1915); 323;

ثمة مقترح شبيه عند:

F.A. Lindemann، Philosophical Magazine 30 (1915): 560.

4. كيف يقرر الإلكترون؟

ص. 61: حين يجهد نفسه في التفكر، تخمد ملامحه: مقابلة أ ت ف ك مع جي. فرانك.

ص. 61: صادف بور صعوبة في التكيف مع أسلوب الحياة الإنجليزية: مصادر عهد بور في كيمبردج هي مقابلات أ ت ف ك مع نيلز ومارجريت بور، رسائل بور في:

Bohr، CWm vol. 1; and Pais 1986، 194– 95.

ص. 63: "الحدث الأغرب في حياتي":

E. de Anrade، Rutherford and the Nature of the Atom (New York: Doubleday، 1964)، 11.

يقال إن هذه الكلمات، التي كثيرا ما اقتبست، قد وردت في رسالة لرذرفورد، غير أنه ليست هناك أية تفاصيل أخرى. يقول Eve في ص. 197 إن رذرفورد عقد مقارنة مع رصاصة مسدس ترتد من قطعة ورق.

ص. 65: فكرة كموم الطاقة: مقابلة مع بور في أ ت ف ك.

ص. 66: "ليست هناك محاولة لطرح أساس ميكانيكي":

Bohr، CW، vol. 2، 136.

ص. 67: "نعم لقد اطلعت عليه"، ملاحظة أبداها اللورد ريلي لابنه، ر.جي. سترت، في:

Strutt، Life of John William Strutt، Third Baron Rayleigh (MadisonL University of Wisconsin Press، 1968)، 357.

ص. 68: "يظهر أن هناك صعوبة كأداء":

Rutherford tp Bohr، March 20، 1913، Bohr، CW، vol. 2، 583.

ص. 69: "القانون الإحصائي ليس سوى قانون رذرفورد في الانحلال الإشعاعي"، Pais، 1991، 191، مقتبسا من بحث لأينشتين نشر عام 1916. كانت التجربة الذهنية البسيطة التي حللها أينتشين هناك مفيدة بشكل لافت. في بحثه أثبت أيضا أنه فضلا عن قيام الذرات سريعة التهيج بإشعاع ضوء بشكل تلقائي، يتعين أن تكون هناك عملية ما يسمى بالإشعاع المثار، حيث احتمال أن تشع الذرة ضوءا كموميا معزز بوجود إشعاع خارجي بالتردد نفسه. لقد أصبحت هذه الملاحظة، بعد نصف قرن، الأساس النظري للميزر [masers] والليزر [lasers].

ص. 69: "أمر السببية": أينشتين لبور، 27 يناير، 1920،

Born، Born and Einstein، Briefwechsel.

5. جرأة غير مسبوقة

ص. 73: "أعداد تختار بشكل عشوائي":

Harald to Bohr، automn 1913، Bohr، CW، vol. 1، 567.

ص. 73: "كله هراء ... مجرد اعتذار رخيص": هذا وملاحظة بورن مقتبسان من مقابلة أ ت ف ك مع لاندي.

ص. 74: "إنجاز عظيم لا مراء فيه":

Sommerfeld to Bohr، Oct. 4، 1913، CW، vol. 2، 603.

ص. 74: "أنه من دأب ألمانيا": Pais 1991، 165، من مقابلة عام 1961 ليست ضمن مجموعة أ ت ف ك.

ص. 75: "أكد لي بور": Heisemberg، 1989، 40.

ص. 77: "لا أعتقد أني قرأت أي شيء بالمتعة التي استشعرت":

Bohr to Sommerfeld، March 19، 1916، Bohr، CW، vol. 2، 603.

ص. 78: "تقريبا مثل أب ثان له":

Rutherford Memorial Lecture 1958، Bohr، CW، vol. 10، 415.

ص. 78: "إنني في الوقت الحالي في أوج التفاؤل":

Bohr to Rutherford، Dec. 27، 1917، Bohr، CW، vol. 3، 682.

ص. 78: "يمارسون اللعب برموزهم"، Eve، 304.

ص. 81: "طالما استمر العلم الألماني على عهده": Heilbron، 88.

ص. 83: "يعملون الآن بجرأة غير مسبوقة في الأزمنة القديمة": Pais، مقتبسا من بحث لبلانك نشر عام 1910.

ص. 83: "قام روبرت أي. ميليكان بقياس دقيق للأثر الكهرومغناطيسي":

Millikan، Physical Review 8 (1916);

الاقتباسان من صفحتي 388، 383 على التوالي.

6. عوز المعرفة لا يضمن النجاح

ص. 87: "شخصية أقوى من الكاهن الكاثوليكي": فون مين وشكنج [Von Meyenn and Shucking]؛ الملاحظة مقتبسة من رسالة بعث بها بولي إلى كارل يونغ [Carl Jung]، في 31 مارس، 1953.

ص. 88: "بولي أراد أن يلتزم بشكل صارم بالمعطيات التجريبية": مقابلة أ ت ف ك مع هايزنبرج.

ص. 88: "ضمير الفيزياء": كان هذا لقبا شهيرا لبولي، ذكره إنز [Enz] وكثير آخرون. غير أني لم أستطع أن أحدد من كان أول مستخدميه.

ص. 89: "ميونخ كانت تمر بحالة فوضى شاملة": Heisenberg، 1971، 8.

ص.89: "شخص مدهش حقا": في رسالة بعث بها سمرفيلد إلى جيلتر، في 14 يناير 1919؛ مقتبسة من Enz، 49.

ص. 90: "ما نستمع إليه هذه الأيام": مقدمة سمرفيلد لـ:

Atomau und Spektrallinien (Braunschewif; F. Viewg and Sohn، 1919).

ص. 91: "كان بولي يصف سمرفيلد في غيابه بعقيد الهوصار": Heisenberg ، 1971 ، 24 ، ومقابلة أ ت ف ك.

ص. 91: "كان شبيها بسوق لتبادل الآراء": هايزنبرج، مقابلة أ ت ف ك.

ص. 92: "أسهل بكثير أن يجد المرء طريقه": Heisenberg، 1971، 26.

ص. 93: "كانت رغبتي في البداية دراسة الرياضيات": Heisenberg، 1989، 105.

ص. 93: "إذا قال شخص ما إنني لم أكن مسيحيا": Cassidy، 1992، 13.

ص. 94: ""تمر فترة طويلة لا تحصل فيها أسرنا على كسرة خبز": بخصوص حياة هايزنبرج في شبابه في ميونخ، انظر: Heisenberg، 1971، الفصل 2، ومقابل أ ت ف ك.

ص. 94: "الشرنقة التي يحمي فيها المنزل والأسرة الشباب": Heisenberg، 1971، 1.

ص. 95: "هذا الأسلوب الحياتي المؤقت": من:

Cj. 14 of Doctor Faustus، in the recent transaltion by John E. Woods (New York: Vintage International، 1999).

ص. 95: "في هذه الحالة، فقد ضعت كلية في الرياضيات": Heisenberg، 1971، 16.

ص. 96: "لقد فهمت النظرية بدماغي": Heisenberg، 1971، 29.

ص. 97: "وكما قال لاندي بعد ذلك بسنوات عديدة": مقابلة مع لاندي في أ ت ف ك.

ص. 98: "إنها تعمل بنجاح، غير أن أساسها عير واضح تماما": سمرفيلد في رسالة بعث بها إلى أينشتين في 11 يناير 1922:

Enstein and Sommerfeld، Briefwechsel.

ص. 98: "ولكن اللعنة! أستطيع أن أرى أنها صحيحة": هايزنبرج، مقابلة أ ت ف ك.

7. أنى للمرء أن يكون سعيدا؟

ص. 101: "بعد ذلك تبادل أينشتين وبور رسائل الإعجاب": رسالة من أينشتين إلى بور في 2 مايو 1920؛ ورسالة من بور إلى أينشتين، في 20 يونيو 1920؛

Bohr، CW، vol.، 634.

ص. 102: "كشفت كل كلمة قالها عن سلسلة من الأفكار المؤسسة" والملاحظات التالية: Heisenberg، 1971، 39، 38.

ص. 104: "غير قابل لأن يعبر عنه في القوانين الكمية الدقيقة"؛ بيز ... يعلق

بشكل مبهم بقوله "إن الاستخدام العملي لمبدأ التطابق يتطلب لقانة فنية." سيرجي يشرح ذلك بقوله إنه يعني عمليا "أنه كان لبور أن يسلك على هذا النحو". Pais 1986، 247، مقتبسا من كتاب لـ هـ.أ. كرامرز و هـ. هولست [L.H. Kramers and H. Holst] ثم مضيفا ملاحظاته الخاصة؛ Serge، 125.

ص. 104: "عموميات ومسائل ذوقية": Cassidy، 1992، 13؛ من رسالة بعث بها هايزنبرج لوالديه.

ص. 106: "إن بولي الصغير مثير جدا": رسالة بعث بها بورن إلى أينشتين، في 29 نوفمبر، 1921،

Born، Born and Einstein، Briefwechsel.

ص. 106: "منذ البداية افتتنت به": مقابلة أ ف ت ك مع بورن.

ص. 106: "لقد أعجبت بعظمة مفهومه": Born، 1968، 30.

ص. 107: "مختلفا تماما؛ لقد كان قرويا صغيرا حين جاء": مقابلة أ ف ت ك مع بورن.

ص. 107: "لقد كنت أعتقد دوما أن الرياضيات كانت أبرع منا": مقابلة أ ف ت ك مع هايزنبرج.

ص. 108: "أنى للمرء أن يكون سعيدا":

Pauli، Science 103 (1946): 213.

ص. 108: "بدأ بعض منا يشعر" : Heisenberg، 1971، 35.

8. أفضل أن أكون إسكافيا

ص. 111: "دكتور نيلز بور" والملاحظة التالية:

New York Times، Nov. 7 and 16، 1923.

ص. 112: "إن هذا الاتفاق اللافت بين المعادلات والتجارب":

A.H. Compton، Physical Review 21 (1923): 483.

ص. 112: لا أحد في ألمانيا يقرأ Physical Review": مقابلة أ ف ت ك مع هايزنبرج.

ص. 113: "بور هو الله وكرامرز نبيه": ملاحظة شهيرة، انظر Enz، 36.

ص. 114: "قصة لم يكشف عنها إلا مؤخرا": Dresden، 292.

ص. 116: ""أعرب سلاتر عن شدة إثارته": Pais، 1991، 235.

ص. 117: "سوف نفترض أن ذرة معطاة": من بحث ب ك س، مضمن في van der Waerdwen.

ص.117: "ينطق آراءه مثل شخص يتحسس طريقه": Pais، 1991، epigraph.

ص. 117: "ليس في وسعك أن تلزم بور بأي إقرار": مقابلة أ ف ت ك مع روزنفيلد.

ص. 118: "سطحي تماما": رسالة من بولي إلى بور، 2 أكتوبر، 1924،

Bohr، CW، 1924، vol. 5، 418.

ص. 118: "أفضل أن أكون إسكافيا": رسالة من أينشتين إلى بور، 29 أبريل، 1924،

Born، Born، and Einstein، Briefwechsel.

ص. 118: "هل تستطيع أن تشرح لي ماذا كانت نظرية ب ك س؟": مقابلة أ ف ت ك.

ص. 119: "يبدو لي أن السؤال الأكثر أهمية هو التالي": رسالة بولي إلى بور، 21 فبراير، 1924، Pauli، Briefwechsel.

9. شيء ما حدث

ص. 123: في امتحان هايزنبرج الشفهي": مقابلة أ ف ت ك لهايزنبرج.

ص. 124: "لقد نشر [بورن] بحثا يدعو فيه إلى نسق جديد في "ميكانيكا الكم": البحث، وعنوانه هو "Quantum Mechanics"، مضمّن في der Waerdwen.

ص. 125: "أما رذرفورد، الذي لم يكن شخصية كسولة، فقد أثنى على بور": Pais، 1991، 261، مقتبسا من رسالة بعث بها رذرفورد إلى بور في 18 يوليو، 1924.

ص. 125: "إن الفيزياء أصبحت الآن جد مشوشة مرة أخرى": بولي لـ ر. كرونيج، في 21 مايو، 1925، في Pauli، Briefwechsel. المفارق أن هذا التعبير الأسيان الذي قاله بولي جاء في وقت حقق أهم إنجازاته في الفيزياء. بالإمعان في التفكر في العدد نصف الكمومي الذي استحدثه لاندي وهايزنبرج لنقلات ذرية بعينها، بينت حسابات بولي وجوب أن يطابق Zweideutikeit بعينه (غموض، أو ثنائية القيمة) في الإلكترون نفسه. الراهن أنه اقترح عددا كموميا رابعا، كامن في الإلكترون بدلا من أن يكون خاصية للأفلاك الإلكترونية، يمكن أن يتخذ إحدى قيمتين. بعد ذلك اقتيد بولي إلى مبدئه الشهير في الاستبعاد، الذي يقر أن كل إلكترون موجود في الذرة محدد بتوليفة متفردة من أربعة أعداد كمومية، بحيث يستحيل على أي إلكترونين أن يشغلا الموضع نفسه. بعد ذلك بقليل، قام س. جاودشمت وج. أوهلن بيك [S. Goudsmit and G. Uhlenbeck] بتأويل Zweideutikeit الذي يقول به بولي، على أنه درور إلكترون، التي تأتي في نصف قيم حين تقارن مع كمية الحركة الزاوية الفلكية التي يمكن لأي إلكترون أن يختص بها. على هذا النحو المضني، استبين أن نصف الكم الذي يقول به هايزنبرج ليس بعيدا عن الحقيقة.

ص. 125: "أصبح الآن كل شيء في يد هايزنبرج": مقابلة أ ف ت ك لـ ف. سي. هويت.

ص. 126: "كان دائما سيدا مثاليا": مقابلة أ ف ت ك مع هايزنبرج.

ص. 126: "لقد صدمت تماما ... وغضبت كثيرا"، المرجع نفسه.

ص. 126: "دائما ما تسير الأمور على نحو غريب معه": بولي لبور، 11 فبراير، 1924، Pauli، Briefwechsel.

ص. 127: ""اقترحت الفكرة نفسها": Heisenberg، 1958، 39.

ص. 127: "حسن؛ شيء ما حدث": هذا وتفاصيل أخرى عن إقامة هايزنبرج في هيلجولاند موجودة أساسا في مقابلة أ ف ت ك.

ص. 131: "كتب ما أسماه "البحث المجنون"": هذا ما يتذكره بورن من مقابلة أ ف ت ك معه لما قاله هايزنبرج.

ص. 131: "صوريا وضعيفا": هايزنبرج لبولي، 9 يوليو، 1925، Pauli، Briefwechsel.

ص. 131: "بدا جد غامض": بورن لأينتشين، 15 يوليو، 1925،

Born، Born، and Einstein، Briefwechsel.

ص. 131: " لعل كرامرز أخبرك": هايزنبرج لبور، 31 أغسطس، 1925،

Bohr، CW، vol. 5، 366.

ص. 131: "هناك محاولة قامت للحصول على أسس":

Heisenberg، Zeitschrift fur Physik 33 (1925); translasted in van der Waerden.

ص. 131: "منحتني [نفحة جديدة] joie de vivre": بولي لـ ر. كرونيج، 0 أكتوبر، 1925، Pauli، Briefwechsel.

ص. 132: "لقد وضع هايزنبرج بيضة كموكية كبيرة": أينشتين لاهرفنست، 20 سبتمبر، 1925، اقتبست من Dresden، 51.

10. روح النسق القديم

ص. 135: "إن الضباب بدأ ينقشع": Moore، 187، يقتبس رسالة من أينشتين إلى ب. لانجفين [P. Langevn]، يقول فيها "Er hat eine Ecke des grossen Schleiers gelueftet"، التي تعني حرفيا "أنه [دي بروجلي] قد رفع ركنا من الحجاب الكبير". غير أن Schleier قد تعني أيضا ضباب الغلاف الجوي، كما أن الفعل luften قد يترجم بكلمة "يبدد"، وهذا مأتى ترجمتي الحرة.

ص. 138: " "طبقات زبدية" لمجال موجي مؤسس": Moore، 187، مقتبسا من بحث لهايزنبرج نشر عام 1926.

ص. 138: "هيجان شهواني متأخر في حياته": Moore، 191 ؛ هذه ملاحظة لهيرمان ويل.

ص. 139: "إن مفهوم بحثك ينبئ بعبقرية حقيقية"، و"إنني مقتنع بأنك أنجزت تقدما حاسما": أينشتين لشرودنجر، 16 و 26 أبريل، 1926، Przibram.

ص. 140: "أعلم أنك مولع بالشكلانية [الصورانية] المملة والمعقدة": Born، 1978، 218.

ص. 140: "هايزنبرج كان غاية في البراعة": مقابلة مع بورن في أ ف ك ت.

ص. 141: "المهمة التالية في إنقاذ ميكانيكا هايزنبرج": بولي لكرونيج، 9 أكتوبر، 1925، Pauli، Briefwechsel.

ص. 141: "إن تذمرك الذي لا ينتهي من كوبنهاجن وجوتنجن": هايزنبرج لبولي، 12 أكتوبر، 1925، المرجع نفسه.

ص. 142: "لست في حاجة لأن أقول لك": هايزنبرج لبولي، 3 نوفمبر، 1925، المرجع نفسه.

ص. 142: "لقد خفت إن لم أكن صددت":

Schrodinger، Annalen der Physi; 79 (1926): 735.

ص. 143: "جد معقدة ومجردة على نحو مروع": Cassidy، 1992، 213، مقتبسا من بحث لسمرفيلد نشر عام 1926.

ص. 143: "بينما فهم أسفي على انتهاء ميكانيكا الكم": Heisenberg، 1971، 72.

ص. 143: "انطباعي العام": سمرفيلد لبولي، 26 يوليو، 1926 Briefwechsel، Pauli.

11. أميل إلى التخلي عن الحتمية

ص. 147: "معقل الفيزياء الرئيس في ألمانيا": Heisenberg، 1989، 110.

ص. 148: "كان يبدو مثل قروي، ... مثل صبي النجار": Born، 1978؛ 212؛ Pais، 297، 1991.

ص. 148: "مشى الاثنان في الشوارع في طريقهما إلى بيت أينشتين": مقتبس في معظمه من Heisenberg، 1971، الفصل الخامس.

ص، 148: "لعلني استخدمت نوع الاستدلال نفسه": المرجع نفسه، 63.

ص. 150: "المحاولات الراهنة للحصول على صياغة أعمق": أينشتين لسمرفيلد، 21 أغسطس، 1926، في:

Einstein and Sommerfeld، Briefwechsel.

ص. 150: "لم يشعر أينشتين إطلاقا أنه في موطنه بين "البروسيين الشقر الفاترين": Frank، 113.

ص. 150: "كلما أفكرت فيها، وجدتها أكثر مدعاة للنفور": هايزنبرج لبولي، 8 يونيو، 1926، Pauli، Briefwechsel.

ص. 152: "لقد كان في وسع هايزنبرج بالذات أن يقول إن معنى عناصر المصفوفة بوصفها احتمالات": مقابلة أ ف ت ك مع هايزنبرج.

ص. 152: "لقد تعودنا الركون إلى اعتبارات إحصائية": مقابلة أ ف ت ك لبورن.

ص. 153: "هنا تثار مسألة الحتمية برمتها":

Born، Zeitschrift fur Physik 37 (1927): 853.

ص. 153: "ميكانيكا الكم مهيبة": أينشتين لبورن، 4 ديسمبر، 1926:

Born، Born، and Einstein، Briefwechsel.

"النموذج الأفضل" "The Real McCoy" هي ترجمتي لعبارة أينتشين "der wahre jakob" التي تظل تستعمل في بعض مناطق ألمانيا. قد تشير هذه العبارة إلى القصة العبرية التي تظاهر فيها يعقوب بأن يكون أخاه عيسى كي يحظى بمباركة أبيه، إسحق، حين تقدم به السن وأصيب بالعمى.

ص. 153: "كانت السيدة بور تغمره بالشاي والكعكة المحلاة": انظر ذكريات هايزنبرج في روزنتال في Heisenberg 1971، الفصل السادس.

ص. 154: "هل نحن أقرب حقيقة إلى حل الأحجية؟": أينتشين لسمرفيلد، 28 نوفمبر، 1926، في:

Einstein and Sommerfeld، Briefwechsel.

12. كلماتنا ليست معبرة

ص. 159: "سرعان ما تشرع المحادثة في الخوض في مسائل فلسفية": Moore، 228، مقتبسا من رسالة بعث بها شرودنجر إلى فين، في 21 أكتوبر، 1926.

ص. 159: "تحت طائلة مشاعر الافتتان": Pais، 1991، 295.

ص. 160: "ولأني وجدت أنه ليس بمقدوري أن أعبر عن نفسي بالفرنسية": مقابلة أ ف ك ت مع ديراك.

ص. 160: "لقد استبين أن الحصول على تأويل أصعب من مجرد إعداد المعادلات": Pais، 1991، 295.

ص. 160: "كان لهذين الرجلين أن يمضيا ساعات معا خلال النهار": انظر خصوصا تصور هايزنبرج في روزنتال.

ص. 161: "أحيانا ينشأ لدي انطباع أن بور حاول فعلا أن يقودني إلى Glatteis": مقابلة أ ف ك ت مع هايزنبرج.

ص. 162: "لك أن تنظر إلى العالم عبر الـ p's": بولي لهايزنبرج، 19 أكتوبر، 1926:

Pauli، Briefwechsel.

ص. 166: "كلماتنا ليست معبرة": مقابلة أ ف ك ت لهايزنبرج.

ص. 166: "لا ريب في أن كل النتائج البحث صحيحة": هايزنبرج لبولي، 16 مايو، 1927:

Pauli، Briefwechsel.

ص.166: "في المحتوى المحسوس لعلم الحركة النظري والميكانيكا، "في المحتوى المادي ..."، و"بدهي":

Gassidy 1992، 226; Pais 1991، 304; Beller، 69 and 109.

13. معجم تعاويذ بور المربع

ص. 173: "الكلمة الأخيرة في هذا الموضوع" و" يكيفون أساليبنا في الإدراك الحسي":

Nature 121 (1928)، supp.: 579 (editorial comment) and 580 (Bohr). Reprinted in Bohr، CW، vol.، 6، 52.

ص. 175: "تمنحنا نظرية جديدة في الضوء": Pais، 1982، مقتبسا بحثا لأينشتين نشر عام 1909.

ص. 175: "قام بول اهرنفست بكتابة فقرة من سفر التكوين حول بابل على السبورة": Marage and Wallenborn، 154.

ص.175: "عبّر هايزنبرج وبولي عن عدم اهتمامهما": Pais 1991، 318، مقتبسا من سرد ذكريات لأوتو سترن [Otto Stern].

ص. 177: " وقد اعترف بور في محادثة خاصة أنه لم يفهم كلية": المرجع نفسه، من ملاحظات بخط يد بور.

ص. 177: "التصور المهم الوحيد للنزاع بين أينشتين وبور": ذكريات بور، كتبت من أجل كتاب شيلب [Schilpp]، وقد أعيدت طباعتها في Bohr، 1961.

ص. 179: "كما في لعبة الشطرنج، ... معجم تعاويذ بور المربع": إهرنفست لجاودشمت:

Uhlenbeck، and Dieke، Nov. 3، 1927، Bohr، CW، vol. 6، 38 (English)، 415

(German).

ص. 179: "استمعت إلى حججهم"، ديراك في Hilton and Elkana، 84.

ص. 179: " فلسفة ... هايزنبرج–بور المهدئة": أينشتين لشرودنجر، 31 مايو، 1928، Przibram.

14. الآن كسبت المباراة

ص. 183: "قبيل نهاية صيف 1928، توقف ... روسي صغير": Gamow، 54–55.

ص. 183: "في اللقاء الثاني مع أينشتين":

Bohr in Schillp، 224.

ص. 187: "يتبعه جمع أقل شأنا" والملاحظات التالية: مقابلة أف ك ت لروزنفيلد.

ص. 188: "كنا سعداء تماما": مقابلة أ ف ك ت مع هايزنبرج.

ص. 189: "وجدت فيه اسمي في الصحف": Born، 1968، 37.

ص. 191: "الزمن كفيل بفصل الغث عن السمين": Heilborn، 154.

ص. 191: "بلانك كان شريفا 60 بالمائة فقط": Folsing، 668، مقتبسا من رسالة بعث بها أينتشين إلى ف. هابر [F. Haber]، في 8 أغسطس، 1933.

ص. 191: "زيارة إلى ألمانيا في أيام حكم هتلر الأولى": مقابلة أ ف ك ت لروزفيلد.

15. خبرة حياة لا خبرة علمية

ص. 195: "زائر أمريكي لجوتنجن":

K. Compton، Nature 139 (1937): 238.

ص. 195: "إني مقتنع ... بأن حركة الخلاص من السببية في الفيزياء": هذا والملاحظات التالية من Forman.

ص. 198: "إن مثل هذا التفكير ... لا يعني سوى": Gay، 79.

ص. 199: "جوته " " كان يكره الرياضيات" :

Spengler، vol. 1، 25.

ص. 199: "فكرة القدر ... تطلب خبرة حياة لا خبرة علمية": المرجع نفسه، 117.

ص. 200: "في المساء يوافق المرء على ما يقول": أينشتين لبور، 27 يناير، 1920:

Born، Born، and Einstein، Briefwechsel.

ص. 201: "ظل كلاسيكيا لا ثوريا":

Mehra and Rechanberg، vol. 1، xxiv.

16. إمكانات التأويل الواضح

ص. 207: وهكذا فإنه يعتقد بمعنى ما: ملاحظات أينشتين مستلة من محاضرته:

On the Method of Theoretical Physics (New York: Oxford University" Press 1933).

كتبت المحاضرة بالألمانية، كما توضح ملاحظة تمهيدية، ثم ترجمت إلى الإنجليزية، أحيانا بطريقة فجة، بمساعدة بعض علماء الفيزياء في أكسفورد. وعوضا عن التعبير غير المناسب "competent to comprehend reality" ("مقتدر على استيعاب الواقع")، استعرت عبارة "capable of comprehending reality" "قادر على فهم الواقع" من النسخة الإنجليزية من Folsing 674.

ص. 207: "إنني لا أستطيع أن أفهم ما يعنيه وصف نظرية بأنها بسيطة، إذا لم تكن صحيحة": روزنفيلد في Rozental، 117.

ص. 208: "هل يمكن للوصف الكم-ميكانيكي للواقع الفيزيائي أن يكون كاملا":

A. Einstein، B. Podolsky، and N. Rosen، Physical Review 47 (1935); reprinted in Toulmin.

ص. 210: "نزل علينا الهجوم كالصاعقة": روزنفيلد في Rozental، 232.

ص. 210: "بيان البحث وقوة حجته الظاهرة": بور في Schilpp، 232.

ص. 210: "كارثة .. هدر بعض الحبر والأقلام": بولي لهايزنبرج، 15 يونيو، 1935:

Pauli، Briefwechsel.

ص. 210: "بالطبع يرتهن قدر كبير من الحجة معنى":

E.U. Condon quoted in The New York Times، May 4، 1935.

ص. 210: "بور ... على نحو غير مفاجئ": مقابلة أ ف ك ت مع بور.

ص. 211: "ما الذي يمكن لهم أن يعنوه من هذا؟ هل تفهمه؟": روزنفيلد في Rozental، 129.

ص. 211: "التناقض الظاهر لا يكشف ... إلا": وملاحظات أخرى من رد بور على أ ب ر:

Physical Review 48 (1935): 696.

ص. 212: "حين أقرأ تلك الفقرات": بور في Schilpp، 234.

ص. 212: "تخليا نهائيا عن فكرة السببية الكلاسيكية": من رد بور على أ ب ر:

Physical Review 48 (1935): 696.

ص. 212: "مبدأ بور في التكاملية": أينشتين في Schilpp، 674.

ص. 214: "مروعا" و"خيانة عظمى": Moore، 314، مقتبسا من رسالة من شرودنجر إلى أينتشين في 23 مارس، 1936.

ص. 214: "من الخطأ أن نعتبر أن مهمة الفيزياء البحث في الكيفية التي تكون عليها الطبيعة": Peterson.

ص. 215: توقف عن شغل نفسه "بالقضايا الأساسية، فهي صعبة تماما علي": Cassidy 1992، 290، مقتبسا من رسالة من هايزنبرج إلى بور في 27 يوليو، 1931.

ص. 215: "إننا لا نستطيع ولا يتوجب علينا الاستعاضة عن هذه المفاهيم بأية مفاهيم

أخرى": Heisenberg، 1958، 44.

ص. 216: "عالم الفيزياء جون بل استنبط... بطريقة بسيطة بشكل بارع تجربة معقولة": البحث الذي يعلن عن مبرهنة بل المحتفى بها، والذي نشر أصلا عام 1964، هو البحث الثاني في Bell.

17. أرض لا أحد، بين المنطق والفيزياء

ص. 221: "مجرد طريقة في الحديث عن الاكتشافات السابقة": مقابلة أ ف ك ت مع ديراك.

ص. 221: بور كان في أعماقه فيلسوفا أكثر منه فيزيانيا: هايزنبرج في Rozental، 95.

ص. 221: "في عام 1932، تحدث بور عن "الضوء والحياة": هذه والمحاضرات التالية كلها Bohr 1961.

ص. 222: "لمفهوم القصد، الغريب عن التحليل الميكانيكي": من محاضرة "Light and Life".

ص. 223: "أني ما خلصت إلى حكم محدد": مقابلة أ ف ك ت مع روزنفيلد.

ص. 226: "أرض لا أحد، بين المنطق والفيزياء": Popper، 215.

ص. 226: "بحثا مفيدا":

"Causality in Cintemporary Physics":

بحث نشره شلك عام 1931 أعيد نشره في Toulmin.

ص. 227: "تأويل بديل لميكانيكا الكم":

Bohm، Physical Review 85 (1952): 166 and 180.

ثمة عرض أحدث في:

Bohm and B.j. Hiley، The Undivided Universe (New York: Roitledge، 1993).

يبدو أن بيلر [Beller] تلمح أحيانا إلى أنها تجد صيغة بوم أفضل من تأويل كوبنهاجن، في حين أن:

S. Goldstein، in The Flight from Science and Reason، ed.، ed. P. Gross، N. Levitt، and M. Lewis (New York: New York Academy of Sciences، 1996)،

يعتبر اعتناق كوبنهاجن مثيلا لاعتناق اللاعقل والعلموية. في كتابي:

Where Does the Weirdness Go? (New York: Basic Books)، 111– 21 ،

أعرض بعض الأسباب التي تبين لماذا لا تعد نظرية بوم نظرية رائعة هي الأخرى.

ص. 228: "إن هذا الأسلوب يبدو لي رخيصا جدا": أينشتين في رسالة إلى بور، في 12 مايو، 1952،

Born، Born، and Einstein، Briefwechsel

18. فوضى في نهاية المطاف

ص. 231: "كلما كانت وسائل الإعلام أكثر دقة في قياس الوقائع الفردية، بدت شؤون الحرب أكثر ضبابية عند الملاحظ":

Tony Blankley، Washington Times، April 3، 2003.

ص. 232: "صيغ، أشكال":

Gore Vidal's essay، New York Review of Books، July 17، 1976،

وانظر الرسائل في عدد 28 أكتوبر.

ص. 235: The West Wing: الفصل الخامس، الحلقة 18، "Access".

ص. 235: "وجد نفسه في أرض بكر لم يطأها أحد من قبل": Adams، 457 –58.

ص. 235: "يشعر عالم الفيزياء العادي": انظر Bell، 28n8، وهو بحث كتبه بالاشتراك مع م. نويبرج.

حاشية

ص. 241: "لا يحبذ "هذا النوع الذي تحبذ من الفيزياء": مقابلة أ ف ك ت مع هايزنبرج.

ص. 241: " كان بينها رجلا لطيفا": مقابلة أ ف ك ت مع مارجريت بور.

ثبت المراجع

من الأدبيات الهائلة التي كتبت في موضوعة نظرية الكم وتاريخها، لم أطلع إلا على جزء يسير، كما أنني لم أضمّن في هذه القائمة سوى جزء أيسر وجدته مفيدا بوجه خاص.

Adams، H. The Education of Henry Adams. Boston: Houghton Mifflin، 1961.

Bell، J. S. Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Cambridge، U.K.: Cambridge University Press، 1987.

Beller، M. Quantum Dialogue: The Making of a Revolution. Chicago: University of Chicago Press، 1999.

Bohr، N. Atomic Physics and Human Knowledge. New York: Science Editions، 1961. (Includes «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics،» from Schilpp 1949.

– Collected Works. Ed. L. Rosenfeld. 11 vols.Amsterdam: Holland، 1972– 87.

Born، M. My Life and My Views. New York: Charles Scribner's Sons: 1968.

– My Life: Recollections of a Nobel Laureate. New York: Charles Scribner>s Sons، 1978.

Born، M.، H. Born، and A. Einstein. Briefwechsel، 1916 –1955. Kommentiert von Max Born. Munich: Nymphenburger، 1969. In English: The Correspondence Between Albert Einstein and Max and Hedwig Born، 1916– 1955، with Commentaries by Max Born. Trans، I. Born New York: Walker، 1971.

Cassidy، D. C. «Answer to the Question: When Did the Indeterminancy Principle Become the Uncertainty Principle?» American Journal Physics 66 (1998): 278.

– Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg. New York: W. H. Freeman، 1992.

Dresden، M. H. A. Kramers: Between Tradition and Revolution. New York: Springer–Verlag، 1987.

Einstein، A.، and A. Sommerfeld. Briefwechsel. Ed. A. Hermann. BaseL Switzerland: Schwabe، 1968.

Enz، C. P. No Time to Be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli: New York: Oxford University Press، 2002.

Eve، A.. S. Rutherford. Cambridge، U.K.: Cambridge University Press، 1939.

Folsing، A. Albert Einstein. New York: Viking، 1997.

Forman، P. «Weimar Culture، Causality، and Quantum Theory، 19181927–: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment.» Historical Studies in the Physical Sciences 3 (1971): 1.

Frank، P. Einstein: His Life and Times. New York: A. A. Knopf، 1953.

Gamow، G. Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory. New York: Dover، 1985.

Gay، P. Weimar Culture: Th Outsider as Insider. New York: Harper & Row، 1968.

Gillispie، C. C.، ed. Dictionary of Scientific Biography. New York: Scribner، 1970 – 89.

Greenspan، N. T. The End of the Certain World: The Life and Science of Max Born. New York: Basic Books، 2005.

Heilbron، . L. The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck as Spokesman for German Science. Berkeley: University of California Press، 1986.

Heisenberg، W. Encounters with Einstein. Princeton، N. : Princeton University Press، 1989.

- Physics and Beyond: Encounters and Conversations. New York: Harper & Row، 1971.

- Physics and Philosophy. New York: Harper، 1958.

Hendry، J. «Weimar Culture and Quantum Causality.» History of Science 18 (1980): 155.

Holton، G.، and Y. Elkana، eds. Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives. New York: Dover، 1997.

Kilmister، C. W.، ed. Schrodinger: Centenary Celebration of a Polymath. New York: Cambridge University Press، 1987.

Kragh، H. «The Origin of Radioactivity: From Solvable Problem to Unsolved Non-problem.» Archive for the History of the Exact Sciences 50 (1997): 331.

- Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century. Princeton، N.J.: Princeton University Press، 1999.

Kuhn، T. S. Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity، 1894 -1912. Chicago: University of Chicago Press، 1978.

Laqueur، W. Weimar: A Cultural History. New York: G. P. Putnam's Sons، 1974.

Lindley، D. Boltzmann>s Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics. New York: Free Press، 2001.

Marage، P.، and G. Wallenborn. The Solvay Councils and the

Birth of Modem Physics. Boston: Birkhauser، 1999.

Mehra، J.، and H. Rechenberg. The Historical Development of Quantum Theory. 6 vols. New York: Springer، 1982– 2001.

Meyenn، K. von، and E. Schucking. «Wolf gang Pauli.» Physics Today، Feb 2001.

Mommsen، H. The Rise and Fall of Weimar Democracy. Trans. E. Forster and L. E. Jones. Chapel Hill: University of North Carolina Press، 1996.

Moore، W. Schrodinger: Life and Thought. New York: Cambridge University Press، 1989.

Nelson، E. Dynamical Theories of Brownian Motion. Princeton، N.J.: Princeton University Press، 1967. (Second edition، 2001، available at www.math.princeton.edu / nelson books.html.)

Nye، M. J. Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin. New York: History of Science Library، 1972 .

– ed. The Question of the Atom: From the Karlsruhe Congress to the First Solvay Conference، 18601911–. Los Angeles: Tomash، 1984

– Pais، A. Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World. New York: Oxford University Press، 1986.

– Niels Bohr's Times in Physics، Philosophy، and Polity. New York: Oxford University Press، 1991.

– Subtle Is the Lord. . . : The Science and the Life of Albert Einstein. New York: Oxford University Press، 1982.

Pauli، W. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr، Einstein، Heisen u. A. Ed. A. Hermann and K. von Meyenn. Vo!. 1، 1919 –1929. New York: Springer، 1979.

Peterson، A. «The Philosophy of Niels Bohr.» Bulletin of the Atomic Scientists، Sept. 1963، 8.

Petruccioli، S. Atoms، Metaphors، and Paradoxes: Niels Bohr and the Construction of a New Physics. New York: Cambridge University Press، 1993.

Popper، K The Logic of Scientific Discovery. New York: Basic Books، 1958.

Przibram، K، ed. Brief zur Wellenmechanik:Schrodinger، Planck، Einstein، Lorentz. Vienna: Springer، 1963. In English: Letters on Wave Mechanics. Trans. M. J. Klein. New York: Philosophical Library، 1967.

Quinn، S. Marie Curie. Reading، Mass.: Addison–Wesley، 1995.

Rozental، S.، ed. Niels Bohr: His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues. Amsterdam: North–Holland، 1968.

Schilpp، P. A، ed. Albert Einstein: Philosopher–Scientist. Evanston، 1II.: Library of Living Philosophers، 1949.

Segre، E. From X–Rays to Quarks: Modem Physicists and Their

Discoveries. San Francisco: W. H. Freeman، 1980.

Spengler، O. The Decline of the West. Trans. C. F. Atkinson. 2 vols. New York: A A Knopf، 1926– 28.

Stachura، P. D. Nazi Youth in the Weimar Republic. Santa Barbara، Calif.: Clio، 1975.

Stuewer، R. K The Compton Effect: Turning Point in Physics. New York: Science History Publications، 1975.

Toulmin، S.، ed. Physical Reality: Philosophical Essays on Twentieth Century Physics. New York: Harper & Row، 1970.

Waerden، B van der، ed. Sources of Quantum Mechanics. New York: Dover، 1967.

دليل

(ت)

(ث)

(ج)

(ر)

(ز)

(س)

(ق)

(ك)

(ل)

(م)

(ن)



المترجم

د. نجيب المحجوب الحصادي

من مواليد مدينة درنة، ليبيا، عام ١٩٥٢، حصل على درجة الماجستير في الفلسفة من جامعة جورج تاون، عام ١٩٧٧، وعلى درجة الدكتوراه، في فلسفة العلم، من جامعة ويسكانسن، عام ١٩٨٣.

من مؤلفاته: أوهام الخلط، تقريظ العلم، معيار المعيار، نهج المنهج، جدلية الأنا - الآخر، آفاق المحتمل، نتح الكمال، الريبة في قدسية العلم، ليس بالعقل وحده، أسس المنطق الرمزي المعاصر.

ومن تراجمه، معجم أكسفورد، المنتسخة، نظرية المعرفة، قراءات في فلسفة العلوم، طرح الأسئلة، التفكير الناقد في القضايا الأخلاقية، من وجهة نظر منطقية، مقدمة لفلسفة العلم، النظرية السياسية.

عمل عضو هيئة تدريس بقسم الفلسفة بجامعة قار يونس، بنغازي، عشرين عامًا، وبقسم الفلسفة بجامعة الإمارات العربية، العين، ست سنوات، كان خلال أربع سنوات منها رئيسًا للقسم، وخلال عامين عميدًا مشاركًا لكلية العلوم الإنسانية والاجتماعية.

"كتب بأسلوب فاتن، وقراءته خبرة مبهجة ... إنه يلقي الضوء على العنصر البشري في العلم"

_ The Economist

شكّل مبدأ فرنر هايزنبرج في الريبة تحديًا لقرون من الفهم العلمي؛ الأمر الذي وضعه في مواجهة مباشرة مع آلبرت أينشتين، ووضع نيلز بور في خضم إحدى أكثر حالات الجدل حدة في التاريخ العلمي. تقر مبرهنة هايزنبرج وجود حدود فيزيائية لما تمكن لنا الدراية به عن الجسيمات دون _ الذرية؛ ومن شأن هذه الفكرة أن تحدث تداعيات مروعة. يستوعب ديفيد لندلي هذه الواقعة الحاسمة ويشرح واحدًا من أهم الاكتشافات العلمية في التاريخ، استطاع منذ ذلك الحين أن يتجاوز تخوم العلم ويؤثر في كل شيء، من النظرية الأدبية إلى الأعمال التلفزيونية.

"يؤمّن خلاصة مركزة ومفيدة للتقدم المحير الذي أنجزته الفيزياء في بداية القرن العشرين"

_ The New York Times

"إلى حد بعيد، هذا أفضل تصور مبسط اطلعت عليه لتطور فيزياء الكم"

_ Michael D. Gordin, American Scientist

ISBN 978-977-62

دار العين للنشر
Ain for publishing
كلمة
KALIMA

المعارف العامة
الفلسفة وعلم النفس
الديانات
العلوم الاجتماعية
اللغات
العلوم الطبيعية والدقيقة / التطبيقية
الفنون والألعاب الرياضية
الأدب
التاريخ والجغرافيا وكتب السيرة